Dr. WALTER DAUDT

RADIOTEHNIKA

PRVI DIO

FIZIKALNE OSNOVE RADIOTEHNIKE



TEHNIČKA KNJIGA
ZAGREB 1961

Dr. WALTER DAUDT

RADIOTEHNIKA

I. DIO

FIZIKALNE OSNOVE RADIOTEHNIKE



TEHNIČKA KNJIGA
ZAGREB 1961

Naslov originala:

FUNKTECHNIK

Teil I

Die physikalische Grundlagen der Funktechnik

von

Dr. WALTER DAUDT, Berlin

Preveo:
Ing. ROMAN GALIĆ

Tisak: ŠTAMPARIJA „PROLETER" — BEČEJ

Predgovor uz prvi dio

Potreba za dobrom knjigom, koja bi služila za stručno uzdizanje kadrova iz radiotehničke struke, svakodnevno se sve više osjećala.

Želja nam je da ovim djelom tu prazninu popunimo. Odabrali smo ga zato što je pisano jednostavnim stilom i načinom za nivo prosječnog radiotehničara ili naprednog amatera. Ovo izdanje prevedeno je iz njemačkog originala objavljenog u toku 1944—45. godine. Unatoč tome ono nije izgubilo na svojoj aktuelnosti, jer po načinu obrade materije predstavlja jedan od najboljih udžbenika te vrste.

Zagreb, prosinca 1960.

IZDAVAČ

Znak: 221 S — Izdanje: DR. WALTER DAUDT „RADIOTEHNIKA I" — Za izdavača odgovara: ING. KUZMAN RAŽNJEVIĆ — glavni urednik: VISTRIČKA ZVONIMIR — štampanje dovršeno: SIJEČANJ 1961

I. DIO

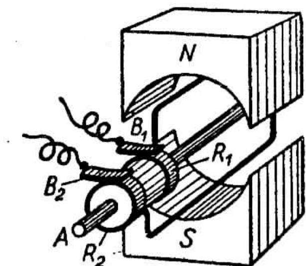
Fizikalne osnove radiotehnike

I. Proizvođenje visokofrekventnih titraja bez elektronskih cijevi

Izmjenična struja

1. — Jedna od osnova radiotehnike i njoj srodnih područja (televizija, prijenos slika, tonfilm) je nauka o izmjeničnoj struji. Iako se može pretpostaviti, da su važnije osobine izmjenične struje čitateljima poznate, ipak ćemo te osnovne pojmove ovdje ponoviti i proširiti.

Okrećeno li petlju od žice, koja se nalazi u magnetskom polju, oko osi A (sl. 1) okomite na linije polja, to se mijenja broj linija, koje kroz petlju prolaze. Zbog toga se mijenja i jakost magnetskog toka, koji prolazi kroz petlju. Po općem zakonu indukcije inducirat će se u petlji napon. Ovaj napon će u potrošaču, koji je priključen preko metalnih prstenova R_1 i R_2 i kefica B_1 i B_2, uzrokovati odgovarajući strujni tok. Inducirani napon ili EMS (elektromotorna sila) bit će najveći, kad se broj linija u petlji m i j e n j a najbrže, dakle onda, kad kroz petlju ne prolazi ni jedna linija ili kad je ravnina petlje u smjeru linija. Leži li naprotiv ravnina petlje okomito na smjer linija, mijenja se broj linija najmanje, a broj linija, koje prolaze kroz petlju, najveći je. U ovom položaju petlje inducirana EMS je najmanja, naime jednaka nuli. Budući da nakon zakreta od 180° magnetske linije protječu kroz petlju u protivnom smjeru, imat će sada i inducirana EMS smjer protivan prvotnome smjeru. U toku jednog čitavog okretaja inducira se dakle u petlji po smjeru i veličini *izmjenična* EMS, odnosno inducira se *izmjenični napon*. Kod jednoličnog okretanja petlje u homogenom (jednoličnom) magnetskom polju m o m e n t a n a vrijednost napona e dana je jednadžbom:



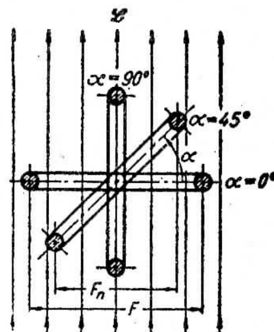
Sl. 1.

$$\boxed{e = E_m \cdot \sin \alpha} \quad \dots\dots\dots \quad (1)$$

Tu je E_m n a j v i š a ili t j e m e n a vrijednost napona, dakle najveća vrijednost, do koje uopće dolazi, a α kut, za koji se petlja zakrene

prema vodoravnom početnom položaju. Ovako dobiveni izmjenični napon je *sinusoidalan* i proporcionalan je tjemenoj vrijednosti i sinusu kuta zakreta. Struja, koju on uzrokuje u potrošaču, naziva se j e d n o f a z n o m s i n u s o i d a l n o m strujom.

2. — Da je dobiveni napon zaista sinusoidalan, vidi se iz slijedećeg razlaganja: Ako petlja u momentu $t = 0$ leži vodoravno (sl. 2), ako je dakle $\alpha = 0^0$, kroz nju će protjecati najveći mogući tok (ukupni broj linija) $\Phi_m = F \cdot B$, gdje je F površina omeđena petljom u [cm²], a B magnetska indukcija (broj linija na cm²) u „gausima" [G]. Zakrenemo li petlju za kut α n a l i j e v o (pozitivni smjer!), to će tok, što ga ona obuhvata, postati manji, te će se dakle inducirati EMS. Magnetski tok je sad $\Phi = F_n \cdot B$, gdje je F_n horizontalna projekcija površine, koju zatvara petlja, jer sada linije protječu okomito samo kroz tu površinu. Budući da površine F i F_n međusobno zatvaraju kut α, bit će $F_n = F \cdot \cos \alpha$, a odavle onda dobivamo $\Phi = F \cdot \cos \alpha \cdot B = \Phi_m \cdot \cos \alpha$. Kut zakretanja možemo međutim mjesto u stupnjevima mjeriti i u lučnoj mjeri (kutu od 360° odgovara na kružnici polumjera 1 — jediničnoj kružnici — luk duljine 2π). Ako je ω kutna brzina petlje, t. j. obodna brzina na jediničnoj kružnici, bit će (prema jednadžbi: put = brzina × vrijeme) luk $\widehat{\alpha} = \omega t$, pa onda imamo:



Sl. 2.

$$\boxed{\Phi = \Phi_m \cdot \cos \omega t} \quad . \; . \; . \quad (2)$$

Izraženo riječima to znači: Magnetski tok obuhvaćen od petlje mijenja se *kosinusoidalno* s kutom zakreta $\widehat{\alpha} = \omega \cdot t$. Međutim, ako u jednoličnom magnetskom polju ne okrećemo petlju, nego zavojnicu, koja ima w zavoja, i ako se pri tome magnetski tok u kratkom vremenu dt mijenja za maleni iznos $d\Phi$[1]), momentana vrijednost napona po zakonu indukcije bit će:[2])

$$\boxed{e = w \cdot \Phi_m \cdot \omega \cdot \sin \omega t \cdot 10^{-8} \; [V]} \quad . \; . \; . \; . \quad (3)$$

U ovoj jednadžbi jedinica za Φ_m je „maksvel" [M], dakle jedinica iz apsolutnog elektromagnetskog sistema mjera. Upotrebimo li praktički, elektrotehnički sistem mjera, postavimo li dakle Φ_m u „volt-sekundama" [Vs], iz jedn. (3) iščezava član 10^{-8}, jer je 1 M = 10^{-8} Vs. Za $\alpha = 90°$

[1]) U izrazima dt i $d\Phi$ „d" znači isto, što i „diferencija" dt ili $d\Phi$ ne znači dakle umnožak d sa t ili d sa Φ. Mogli bismo pisati i $(t_1 - t_2)$, odnosno $(\Phi_1 - \Phi_2)$, ali treba voditi računa o tome, da se vrijednosti s indeksom 1 vrlo malo razlikuju od onih s indeksom 2. Izraz $d\Phi/dt$ daje brzinu promjene toka.

[2]) Za one, koji su u matematici naprednijí, dajemo račun:

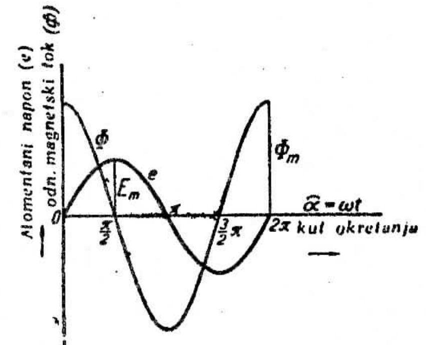
$e = - w \cdot \dfrac{d(\Phi_m \cdot \cos \omega t)}{dt} \cdot 10^{-8}$ [V]. Izračunamo li ovaj jednostavni diferencijal, dobivamo odmah jednadžbu (3).

ili $\widehat{\alpha} = \pi/2$ je $\sin \omega t = \sin 90° = 1$. U tom položaju petlje inducirana EMS je najveća i to: $E_m = w \cdot \Phi_m \cdot \omega \cdot 10^{-8}$ [V]. Umetnemo li ovu vrijednost u jednadžbu (3) dobivamo:

$$\boxed{e = E_m \cdot \sin \omega t} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (4)$$

Time je potvrđena ispravnost jednadžbe (1). Izmjenični napon je zaista sinusoidalan.

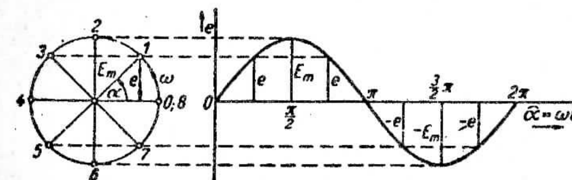
3. — Na sl. 3. prikazana je ovisnost induciranog izmjeničnog napona e (sinusoida) i magnetskog toka Φ, koji prolazi kroz petlju (kosinusoida), o kutu zakreta $\widehat{\alpha}$ u lučnoj mjeri. Sinusoida i kosinusoida dadu se lako nacrtati pomoću „jediničnog kruga" prema sl. 4. Jedna točka putuje po kružnici polumjera 1 unaokolo na lijevo jednolično s obodnom brzinom ω. Pritom na horizontalnu os, desno od jediničnog kruga, nanosimo odgovarajuće udaljenosti točke od horizontalnog pravca, koji prolazi kroz početni položaj točke i kroz središte kružnice. Ove udaljenosti daju momentane vrijednosti napona e. Momentani položaj točke na sinusoidi, odnosno momentana vrijednost napona e, određena je kutom α, koji se naziva *faznim kutom*. Nakon zakreta od $\alpha = 360°$ ili $\widehat{\alpha} = 2\pi$, prošla je jedna perioda izmjeničnog napona. Periodi odgovara vrijeme T, koje se zove v r i j e m e t r a j a n j a p e r i o d e, i mjeri se u sekundama [s]. Nakon vremena T obišla je točka čitavu kružnicu polumjera 1 odnosno put 2π, a taj je jednak umnošku kutne brzine i vremena, dakle $2\pi = \omega T$ ili:



Sl. 3.

$$\boxed{\omega = \frac{2\pi}{T} \left[\frac{1}{s}\right]} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (5)$$

Frekvencija f pokazuje koliko perioda ili titraja ima u jednoj sekundi. Mjera za to je *„herc"* [Hz]. 1 Hz = 1 perioda u sekundi [p/s]. Veće jedinice su *1 kiloherc = 1 kHz = 1000 Hz* i *1 megaherc = 1 MHz = 1 000 000 Hz = 1 000 kHz*. Ako općenito imamo f perioda u sekundi, onda je trajanje jedne periode:



Sl. 4.

$$\boxed{T = \frac{1}{f} \; [s]} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (6)$$

Uvrstivši ovu vrijednost u jednadžbu (5) imamo:

$$\omega = 2\pi f \left[\frac{1}{s}\right] \quad \ldots\ldots \quad (7)$$

ω je *kružna frekvencija*, što znači broj perioda u 2π sekunda. Na taj način se vrijeme može izraziti kutom (u lučnoj mjeri), jer je $\widehat{\alpha} = \omega t$, odnosno $t = \widehat{\alpha}/\omega$. Tako je, na primer, za tehničku izmjeničnu struju frekvencije 50 Hz, prema jednadžbi (6): $T = 1/50 = 0{,}02$ s, a prema jednadžbi (7) $\omega = 2\pi \cdot 50 = 100\pi = 314$ [1/s].

Ponavljanje

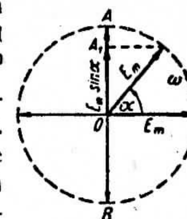
Ako se zavojnica s w zavoja okreće jednoličnom kutnom brzinom ω u homogenom magnetskom polju B, inducirat će se u zavojnici *sinusoidalni izmjenični napon. Momentana* vrijednost ovog napona dana je jednadžbom $e = E_m \cdot \sin \omega t$. Tu je E_m najviša ili tjemena vrijednost izmjeničnog napona. Pritom vrijedi: $E_m = w \cdot \Phi_m \cdot \omega \cdot 10^{-8}$ [V], gdje je Φ_m najveći magnetski tok, koji prolazi kroz zavojnicu. Tok, koji kroz zavojnicu prolazi, mijenja se kosinusoidalno s kutom zakreta $\widehat{\alpha} = \omega t$ zavojnice, pa je $\Phi = \Phi_m \cdot \cos \omega t$. Ta se ovisnost može grafički prikazati krivuljama. Momentana vrijednost napona e određena je kutom zakreta zavojnice. Ovaj kut se naziva *faznim kutom. Trajanje jedne periode* T je obrnuto razmjerno *frekvenciji* f, t. j. broju perioda u sekundi ($T = 1/f$). Frekvencija izmjeničnog napona, odnosno struje, mjeri se u *hercima* [Hz], *kilohercima* [kHz] i *megahercima* [MHz], pa je 1 MHz = 1000 kHz = 1 000 000 Hz. Mjesto toga računa se često i s *kružnom frekvencijom* $\omega = 2\pi f$. Kružna frekvencija je broj perioda u 2π sekunda.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kako se može proizvesti sinusoidalni izmjenični napon? *Odgovor:* Tako, da se zavojnica jednolično okreće u homogenom magnetskom polju. — *P.*: Kolika je momentana vrijednost ovako dobivenog napona? *O.*: Ta vrijednost je $e = E_m \cdot \sin \omega t$, gdje je E_m najviša ili tjemena vrijednost napona, a ω kutna brzina zavojnice. — *P.*: Kako se ω još označuje? *O.*: Kao kružna frekvencija. — *P.*: Kakva veza postoji između obične i kružne frekvencije? *O.*: Kružna frekvencija je 2π-kratnik obične frekvencije. — *P.*: Kakva veza postoji između frekvencije i trajanja jedne periode? *O.*: Frekvencija je obrnuto proporcionalna vremenu trajanja jedne periode.

4. — Iako je prikazivanje krivuljama (sl. 3 i 4) vrlo zorno i pregledno, točno crtanje ovakvih krivulja oduzima mnogo vremena. Radi toga se u tehnici izmjeničnih struja i radiotehnici često primjenjuje drugi postupak, a to je *vektorsko prikazivanje*. Izmjeničnu struju, odnosno napon, prikazujemo jednostavno zrakom sa strelicom za oznaku smjera. Duljina zrake daje u nekom mjerilu tjemenu vrijednost I_m, odnosno E_m. Radi se dakle o istom postupku, kao kod prikazivanja sila. U početnom položaju $\alpha = 0^0$ zraka ima duljinu E_m (sl. 5). Nakon zakreta za kut α

projekcija OA_1 zrake na okomitu vremensku os AB jednaka je $E_m \cdot \sin \alpha$, jednaka je dakle momentanoj vrijednosti napona e (jednadžba 1). Ako se zraka zakrene za $\alpha = 90^0$ ili $\widehat{\alpha} = \pi/2$, onda je projekcija na vremensku os OA jednaka $E_m \cdot \sin 90^0 = E_m$. Za $\alpha = 0^0$ duljina projekcije je 0. Iz ovog vidimo da projekcija zrake, kad se zraka okreće od desna na lijevo, poprima pojedine vrijednosti točaka sinusoide. Samo crtanje kružnice je suvišno; svaku sinusoidalnu veličinu možemo predstaviti zrakom, kojoj je duljina jednaka tjemenoj vrijednosti. *Pozitivni* smjer vremenske osi neka je *odozdo prema gore* (od 0 prema A). Tada će, kako se vidi iz sl. 5., E_m između $\alpha = 0^0$ i 180^0 biti pozitivno, a između $\alpha = 180^0$ i 360^0 negativno, upravo kao i kod sinusoide. Kasnija izlaganja pokazat će svaki put nanovo prednosti ovog načina prikazivanja.



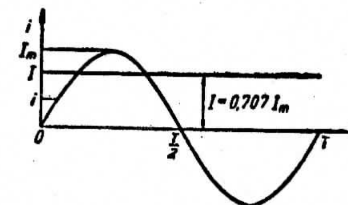
Sl. 5.

5. — Kako smo vidjeli, vrijednosti izmjeničnih veličina neprestano se mijenjaju između pozitivne i negativne tjemene vrijednosti. Da dođemo do nekog prosjeka u vrijednosti izmjenične struje i napona, moramo uvesti pojam neke srednje vrijednosti. Najpoznatija je *kvadratična srednja vrijednost* ili *efektivna vrijednost.* Do nje dolazimo prema činjenici da je toplinsko djelovanje električne struje neovisno o smjeru protjecanja struje, jer je proizvedena toplina uz stalan otpor potrošača razmjerna kvadratu jakosti struje. (Proizvedena toplina dana je sa Q = 0,000239 · I² · R · t [kcal].) Prema tome možemo reći: *„Efektivna vrijednost izmjenične struje jednaka je vrijednosti, koju bi morala imati istosmjerna struja, da u danom otporu proizvede istu toplinu kao izmjenična struja, koja teče kroz taj otpor."* Za razliku od momentane vrijednosti i ili e, odnosno tjemene vrijednosti I_m ili E_m *efektivnu* vrijednost označujemo s I, odnosno E. Kako matematsko-fizikalna razmatranja pokazuju, vrijede za ovisnost između efektivne i tjemene vrijednosti slijedeći odnosi:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\ E_m \left(\text{odn. } U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\ U_m\right) \quad (8)$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\ I_m \quad \ldots \quad (9)$$

Na sl. 6. vidimo odnos između pojedinih vrijednosti. Instrumenti, koje redovito upotrebljavamo za mjerenje izmjenične struje (instrumenti sa zagrijanom žicom, instrumenti s mekim željezom, dinamički instrumenti) pokazuju uvijek efektivnu vrijednost. Isto se tako i vrijednosti napisane na označnim pločicama električkih strojeva odnose na efektivnu vrijednost, ukoliko se izričito drukčije ne naglasi. U mnogim slučajevima, kao na primjer kod ispitivanja



Sl. 6.

probojne čvrstoće izolatora, potrebno je također znati i tjemenu vrijednost. Tada moramo računati s *faktorom tjemena* σ, koji pokazuje odnos između tjemene i efektivne vrijednosti:

$$\sigma = \frac{E_m}{E} = \frac{U_m}{U} = \frac{I_m}{I} \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

Za *posve sinusoidalne* veličine vrijedi: $\sigma = E \cdot \sqrt{2}/E = \sqrt{2} = 1{,}41$. Što je σ veće, to je sinusoida, koja prikazuje izmjeničnu veličinu, šiljastija.

6. — Uz pomoć efektivne vrijednosti možemo dobiti vrlo važnu osnovnu jednadžbu nauke o izmjeničnoj struji. Postavimo li u jednadžbu $E_m = w \cdot \Phi_m \cdot \omega \cdot 10^{-8}$ (vidi odsjek 2.), prema jednadžbi (8) vrijednost $E_m = E \cdot \sqrt{2}$, a prema jednadžbi (7) vrijednost $\omega = 2\pi f$, imamo za sinusoidalan napon $E \cdot \sqrt{2} = w \cdot \Phi_m \cdot 2\pi f \cdot 10^{-8}$ ili $E = (2\pi/\sqrt{2}) \cdot w \cdot f \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8}$, dakle:

$$E = 4{,}44 \cdot w \cdot f \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8}\ [V] \quad . \quad (11)$$

Ovdje je f frekvencija u [Hz], a Φ_m maksimalni magnetski tok u [M]. Efektivna vrijednost napona dobiva se u [V].

Ponavljanje

Sinusoidalne izmjenične veličine možemo umjesto krivuljama prikazati na mnogo jednostavniji način pomoću *vektora*. Za to se uzme usmjerena zraka koja ima duljinu jednaku tjemenoj vrijednosti izmjenične veličine. Projekcija ove zrake na vremensku os daje prema momentanoj vrijednosti kuta zakreta momentanu vrijednost te veličine. Kod izmjeničnih veličina razlikujemo momentanu, tjemenu i efektivnu vrijednost. *Efektivna vrijednost* struje I jednaka je jakosti, koju bi morala imati i s t o s m j e r n a struja, da u otporu, kroz koji teče dotična izmjenična struja, proizvede istu toplinu kao i izmjenična struja. Efektivna vrijednost struje je $I = 0{,}707 \cdot I_m$, a za napon vrijedi: $E = 0{,}707 \cdot E_m$, odnosno $U = 0{,}707 \cdot U_m$. U tehnici se redovito računa s efektivnim vrijednostima. Često je potrebno znati i odnos tjemene vrijednosti prema efektivnoj vrijednosti, to jest faktor σ. Između efektivne vrijednosti napona E u [V], frekvencije f u [Hz] i magnetskog toka Φ_m u [M], postoji za zavojnice s w zavoja važan odnos: $E = 4{,}44 \cdot w \cdot f \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8}$ [V].

Pitanja i odgovori

Pitanje: Na koja se dva načina izmjenične veličine mogu prikazati crtanjem? *Odgovor:* Krivuljama i vektorima. — *P.*: Koje praktične prednosti ima prikazivanje vektorima? *O.*: Nije potrebno crtanje sinusoida, nego se crtaju jednostavne zrake. — *P.*: S koje se tri veličine može odrediti izmjenična struja ili napon? *O.*: Momentanom, tjemenom i efektivnom vrijednošću. — *P.*: Kako se iz efektivne vrijednosti može izračunati tjemena vrijednost? *O.*: Tjemena vrijednost je $\sqrt{2}$ puta veća od efektivne; na primjer $I_m = \sqrt{2} \cdot I$. — *P.*: Što daje faktor σ i koliki je on za sinusoidalne veličine? *O.*: Faktor σ je odnos tjemene vrijednosti prema efektivnoj vrijednosti, a za sinusoidalne veličine vrijedi: $\sigma = \sqrt{2} = 1{,}41$.

Pitanja

1. Kada je struja sinusoidalna?
2. Što pokazuje kružna frekvencija i kolika je ona za tehničku izmjeničnu struju?
3. Kakva je razlika kod označivanja u formulama između momentane, tjemene i efektivne vrijednosti?
4. Kako se može izračunati tjemena vrijednost iz efektivne?

Zadaci

1. Neki odašiljač radi na frekvenciji 191 kHz. Koliko traje jedna perioda i kolika je ovdje kružna frekvencija?
2. Kolika je tjemena vrijednost struje, kojoj je efektivna vrijednost 5 A?
3. Koliko zavoja ima zavojnica, ako kroz nju uz 220 V na priključnicama i kod 50 Hz prolazi magnetski tok s tjemenom vrijednošću 220 000 M?

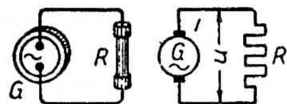
Skin-efekt i radni otpor u krugu izmjenične struje

7. — Priključimo li neki otpor (potrošač) na i s t o m j e r n i napon, poteći će kroz otpor struja, koja će se jednolično razdijeliti po čitavom presjeku. U ovom slučaju govorimo o *otporu za istosmjernu struju* ili *omskom otporu*. Teče li kroz vodič izmjenična struja, pruža joj vodič, osobito kod viših frekvencija, otpor *veći* nego istosmjernoj. Tako na primjer bakrena žica promjera 2 mm ima za struju frekvencije 600 kHz oko 7 puta veći otpor nego za istosmjernu struju. Ovu činjenicu možemo razumjeti, ako zamislimo da se struja koja teče kroz vodič sastoji od međusobno paralelnih „strujnih niti". Linije magnetskog polja, koje proizvode ove niti, u unutrašnjosti vodiča su gušće nego bliže površini, pa izmjenična struja uzrokuje u unutarnjim nitima veće protunapone samoindukcije nego u vanjskima. Ta je pojava istovjetna s povećanjem otpora u unutrašnjosti vodiča, pa struja birajući put manjeg otpora teče kroz niti, koje su bliže površini. Tako uglavnom površina vodiča sudjeluje u provođenju struje, a aktivni presjek vodiča kao da je postao manji. Po tome, što u ovakvim slučajevima u prijenosu struje učestvuje samo površinski sloj vodiča — p o v r š i n s k a k o ž i c a, dobila je ova pojave ime *skin-efekt*, prema engleskom skin ≙ kožica. Uslijed skin-efekta povećani otpor kod izmjenične struje označuje se, za razliku od običnog omskog, kao *radni otpor R*.

8. — Povećanje otpora je to v e ć e, što je veći presjek vodiča i što je viša frekvencija izmjenične struje, koja teče kroz otpor. Kod izmjenične struje visokih frekvencija potisnuta je struja skoro sasvim na površinu vodiča. Kod nižih frekvencija, na primjer kod tehničke izmjenične struje s $f = 50$ Hz, i kod manjih presjeka vodiča, može se skin-efekt zanemariti, pa u tom slučaju omski i radni otpor imaju istu vrijednost. Da se u m a n j i djelovanje skin-efekata, koje u radiotehničkim uređajima može biti vrlo nezgodno, ne izvode se vodiči od masivne žice, nego od tankih upredenih niti, pa se tako dobiva takozvana *visokofrekventna pletenica*, koja se sastoji od raznog broja (5 do 30) tankih (promjera 0,03 do 0,1 mm) lakom izoliranih žica. Time što su upredene, sve žice dolaze izmjenično u sredinu i na površinu pletenice. Za smanjenje *vrtložnih struja* (vrtložne struje su strujni vrtlozi, koji se induciraju u metalnim masama, one uzrokuju gubitke pretvarajući jedan dio električke energije u toplinu) izoliraju se pojedine žice međusobno lakom ili oksidnom prevlakom. U radiotehnici, a osobito kod gradnje odašiljača, upotrebljavaju se često posrebrene *cijevi* ili *plosnati* vodiči. Kod ovih posljednjih su gubici uslijed vrtložnih

struja manji, nego kod kružnih presjeka. Iz ovoga bi odmah moralo biti jasno, da je radni otpor z a v o j n i c e znatno veći od otpora ravne žice. Radi toga moraju z a v o j n i c e s malenim gubicima imati što manji promjer i malenu duljinu namotanog sloja.

9. — Pogledajmo sada odnos struje i napona u krugu izmjenične struje, koji je sastavljen samo od generatora G i radnog otpora R (na sl. 7.). Otpor bez induktiviteta i kapaciteta označuje se u shemama, kako je to prikazano na sl. 7. desno. Za malene odsjeke vremena (dt) može se za izmjeničnu struju uzeti da je istosmjerna, pa za momentane vrijednosti e i i možemo primijeniti Ohmov zakon. Ako nam dakle e znači momentanu, a E_m tjemenu vrijednost, onda za svaki moment vrijedi:



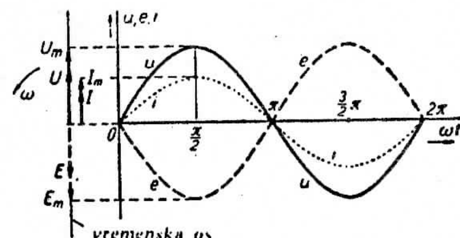
Sl. 7.

$$e = E_m \cdot \sin \omega t = i \cdot R \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

Otpor R sastoji se, strogo uzevši, od vanjskog otpora (potrošača) i unutarnjeg otpora generatora (izvora struje). Napon na priključnicama otpora R, ako unutarnji otpor izvora možemo zanemariti, daje jednadžba:

$$u = U_m \cdot \sin \omega t = U \cdot \sqrt{2} \sin \omega t = i \cdot R \quad . \quad (13)$$

Ovaj napon mora u svakom momentu davati generator kao protunapon $u = -e$, da bi kroz otpor mogla teći momentana struja i. Za ovu struju dobivamo iz jednadžbe (12): $i = (E_m/R) \cdot \sin \omega t$. Struja i je također *sinusoidalna* i u *fazi* s naponom, to jest ove obje veličine poprimaju u isto vrijeme svoju najvišu i najnižu vrijednost. Na sl. 8. krivuljama je prikazana međusobna ovisnost momentanih vrijednosti napona u na priključnicima, EMS izvora e i struje i. Struja i i napon u su u fazi, dok je napon e pomaknut prema njima za 180° ili π, jer je $u = -e$. Na sl. 8. vidimo i v e k t o r s k i prikaz. Napon U, odnosno U_m, nacrtan je u smjeru vremenske osi (vidi odsjek 4). Okrećemo li zraku U_m jednolično kutnom brzinom ω nalijevo, tada njezine projekcije na vremensku os daju udaljenost pojedinih točaka krivulje napona u od horizontalne osi (počevši s $\omega t = \pi/2$, što odgovara kutu $\alpha = 90°$). Isto dakako vrijedi za vektore, koji prikazuju E_m, odnosno I_m. Budući da se u tehnici gotovo isključivo računa s efektivnim vrijednostima, i vektori su nacrtani za ove vrijednosti. One iznose 0,707, odnosno 70,7% od tjemene vrijednosti, dok u kutu nema promjene.



Sl. 8.

10. — Budući da je $e = i \cdot R$ numerički jednako u, to je i $u = i \cdot R$. Zbog toga što su u i i u fazi, bit će dalje $U_m = I_m \cdot R$ i $U = I \cdot R$. Prema tome vrijedi Ohmov zakon! Ukratko možemo dakle reći: *„U krugu izmjenične struje, u kojem se nalazi radni otpor. Ohmov zakon vrijedi za momentanu, tjemenu i efektivnu vrijednost, ako se umjesto omskog otpora (u Ohmov zakon) uvrsti* (veći) *radni otpor. Napon na priključnicama ostaje u fazi sa strujom."*

Induktivitet u krugu istosmjerne struje

11. — Ako se u zavojnici elektromagneta mijenja jakost struje, nasta će, kako je poznato, zbog indukcije između pojedinih zavoja napon samoindukcije E, koji je po smjeru protivan priključenom naponu. Po zakonu indukcije je $E = - w \cdot (d\Phi/dt) \cdot 10^{-8}$ [V]. Uvrstimo li za tok magnetske indukcije vrijednosti $\Phi = F \cdot B = F \cdot \mu \Pi \cdot w \cdot i/l$, dobivamo:[8])

$$E = - L \cdot \frac{di}{dt} \text{ [V]} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

Za razliku od nepromjenljive istosmjerne struje I označili smo p r o m j e n l j i v u struju samoindukcije s i. Napon samoindukcije razmjeran je dakle brzini promjene jakosti struje, a predznak minus znači, da se radi o protu-EMS (Lenzovo pravilo!). Veličina L je *koeficijent samoindukcije* zavojnice, koji je dan s:

$$L = \mu \cdot \Pi \cdot \frac{w^2 \cdot F}{l} \cdot 10^{-8} \text{ [H]} \quad . \quad . \quad . \quad (15)$$

U ovoj jednadžbi, koja je za j e d n o s l o j n e z a v o j n i c e dovoljno točna, znači μ permeabilitet jezgre, Π indukciona konstanta $= 1{,}256$ [M/cmA], w broj zavoja, F presjek zavojnice u [cm²], a l duljina namotanog sloja u [cm]. Jedinica induktiviteta u praktičko-elektrotehničkom sustavu je 1 *„henri"* [H], a u apsolutnom elektromagnetskom je 1 *cm* [cm]. pa je $1\ H = 10^9$ *cm*. Osim toga upotrebljavaju se i manje jedinice: 1 *milihenri* $= 1\ mH = 10^{-3}\ H = 10^6$ *cm* i 1 *mikrohenri* $= 1\ \mu H = 10^{-6}\ H = 10^{-3}\ mH = 10^3$ *cm*. Jednadžba (14) sadržava razjašnjenje za jedinicu samoindukcije: *„Induktivitet 1 H ima ona zavojnica, u kojoj uz jednoličnu promjenu struje od 1 A u jednoj sekundi nastaje EMS samoindukcije od 1 V."*

Ponavljanje

Otpor vodiča u krugu i s t o s m j e r n e struje naziva se *omskim* otporom. Istosmjerna struja raspodjeljuje se jednolično po čitavom presjeku vodiča. Teče li vodičem i z m j e n i č n a struja, ona biva potisnuta prema s l o j e v i m a b l i ž i m p o v r š i n i. Uslijed ove pojave, nazvane *skin-efekt*, vodič za izmjeničnu struju ima veći otpor, nego vodič za istosmjernu struju. Za razliku od omskog otpora, naziva se ovaj veći otpor, otpor za izmjeničnu struju, *radnim otporom*. Djelovanje skin-efekta može se umanjiti upotrebom takozvane visokofrekventne pletenice, cijevi i plosnatih vodiča. Za radne otpore (ako su bez induktiviteta i kapaciteta) vrijedi *Ohmov zakon* i onda, kad kroz njih teče izmjenična struja. Napon na priključnicama otpora, i struja koja teče

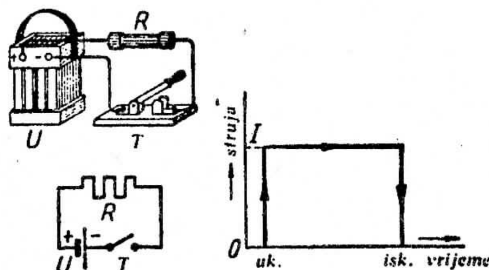
[8]) Za one, koji su u matematici napredniji, dajemo račun: $E = - w \cdot F \cdot \mu \cdot \Pi \cdot (w/l \cdot di/dt) \cdot 10^{-8}$. Nepromjenljive članove skupimo u konstantu $L = \mu \cdot \Pi \cdot \frac{w^2 \cdot F}{l} \cdot 10^{-8}$, pa dobivamo jednadžbu (14).

kroz otpor, *u fazi* su, što znači, da u isto vrijeme prolaze kroz najvišu i najnižu vrijednost. Mijenja li se jakost struje, koja teče kroz zavojnicu, nastaje u njoj *napon samoindukcije,* koji je po smjeru protivan priključenom naponu. Inducirana EMS razmjerna je brzini promjene jakosti struje: $E = - L\ di/dt$ [V]. *Induktivitet* zavojnice ovisan je o dimenzijama zavojnice i permeabilitetu jezgre. U praktičkom mjernom sistemu induktivitet se mjeri u henrijima [H], a u apsolutnom sistemu u [cm], te vrijedi 1 H = 10^9 cm.

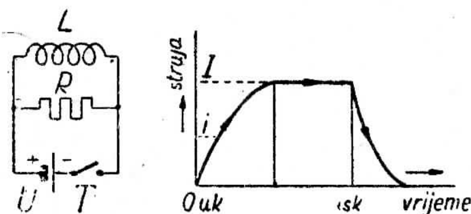
Pitanja i odgovori

Pitanje: Kakva je razlika između omskog i radnog otpora? *Odgovor:* Omski otpor je otpor koji vodič pruža istosmjernoj struji, a radni otpor je otpor vodiča, koji nema induktiviteta ni kapaciteta, za izmjeničnu struju. — *P.*: Zašto je radni otpor veći od omskoga? *O.*: Jer u vodiču, kroz koji teče izmjenična struja, dolazi do potiskivanja struje (skin-efekt), pa struja teče uglavnom kroz slojeve bliže površini vodiča. — *P.*: Kako se može smanjiti skin-efekt? *O.*: Tako da se umjesto obične žice upotrebljava visokofrekventna pletenica, cijev ili plosnati vodič. — *P.*: Kako se ponaša struja i napon u krugu s radnim otporom? *O.*: Oni se podvrgavaju Ohmovom zakonu $(U = I \cdot R)$, dakle su u fazi. — *P.*: O čemu ovisi induktivitet zavojnice? *O.*: O brzini promjene jakosti struje (di/dt) i koeficijentu induktiviteta (L).

12. — Ukopčamo li u krug istosmjerne struje omski otpor, na primjer žarulju, narast će struja odmah na vrijednost I određenu Ohmovim zakonom, a nakon iskapčanja odmah će pasti na vrijednost nula (sl. 9). Na sl. 9. vidimo normirane znakove za čisti omski otpor R, bateriju s naponom U na priključnicama i jednopolni prekidač T. Ako je međutim potrošač zavojnica s induktivitetom L i omskim otporom R, struja će nakon ukopčanja postepeno rasti do pune vrijednosti I (sl. 10.). Kod ukapčanja uslijed nagle promjene jakosti struje nastaje napon samoindukcije, koji djeluje protivno struji, usporavajući porast njezine jakosti. (Usporedba iz mehanike: Vagon zbog tromosti možemo samo postepeno staviti u gibanje.) Porast jakosti struje ide po eksponencijalnom zakonu (vrijedi naime: $i = I \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L} \cdot t}\right)$ gdje je $I = U/R$ konačna jakost struje, $e = 2{,}718$ baza prirodnih logaritama, a t vrijeme).



Sl. 9.



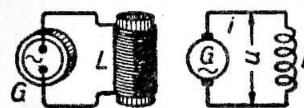
Sl. 10.

Pritom je usporavanje porasta jakosti struje određeno takozvanom vremenskom konstantom $T = L/R$ [s] *„Vremenska konstanta T je vrijeme, za koje struja poslije ukapčanja postizava 63% konačne vrijednosti (i = 0,63 I), odnosno 37% svoje početne vrijednosti iskapčanja.“*[4] Za vrijednost struje 0,5 I imamo na primjer vrijeme $t = 0{,}7\ T$. Ako je dakle $L = 5$ H, a $R = 1000\ \Omega$, struja tek nakon vremena $t = 0{,}7 \cdot 5/1000 = 0{,}0035$ s postizava 50% svoje konačne vrijednosti.

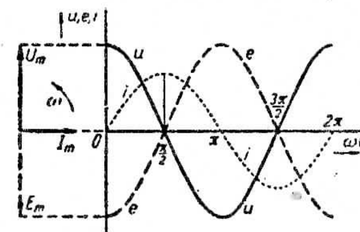
13. — Ako prema sl. 10. strujni krug prekinemo, nastat će napon samoindukcije, koji će sada nastojati spriječiti opadanje jakosti struje. Uslijed toga, što je napon na priključnicama istog smjera, kao i napon samoindukcije, jakost struje opada *postepeno* na vrijednost nula. (U tom slučaju je $i = I \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$.). Usporedba iz mehanike za ovaj slučaj je teško natovaren vagon, koji se giba i nakon prestanka djelovanja sile, koja ga je stavila u gibanje, i postepeno se zaustavlja, dok ne stane. Nakon vremena $t = T = L/R$ jakost struje padne na 37% najviše vrijednosti $(i = 0{,}37\ I)$. Radi primjera navodimo, da kod ukapčanja uzbudnih namotaja velikih generatora prođe po jedna minuta i više, dok struja postigne punu jakost.

Induktivitet u krugu izmjenične struje

14. — Imamo li u krugu izmjenične struje zavojnicu induktiviteta L i radnog otpora R, bit će izmjenična struja slabljena ne samo zbog radnog otpora, nego i zbog protunapona samoindukcije. Za početak ćemo uzeti, da zavojnica nema radnog otpora $(R = 0)$. Momentana vrijednost (sl. 11.) sinusoidalnog napona na priključnicama zavojnice u mora držati ravnotežu s momentanom vrijednošću $e = - L \cdot di/dt$ EMS samoindukcije, a to znači, da u svakom momentu mora biti $u = - e$, da bi izmjenična struja i uopće mogla teći. Nacrtajmo sada krivulje, koje prikazuju promjene veličina, o kojima se radi (sl. 12.), i to najprije krivulju struje i koja teče kroz zavojnicu. Za $\omega t = 0$ jakost struje penje se najbrže (strmina sinusoide najveća), to jest promjena jakosti struje di/dt ovdje je najveća. Zbog toga protunapon



Sl. 11.



Sl. 12.

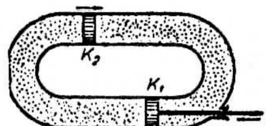
---

[4] Za $t = T = L/R$ imamo naime: $i = I \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{T}}\right) = I \cdot (1 - e^{-1}) = I \cdot (1 - 1/e) = I \cdot (1 - 0{,}37) = 0{,}63\ I$ ili 63% od I.

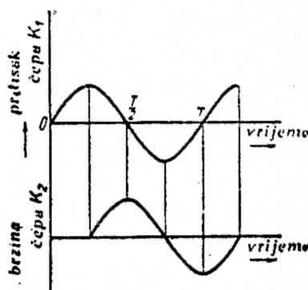
samoindukcije postizava svoju najnižu vrijednost $e = -E_m$. Za $\omega t = \pi/2$, to jest nakon četvrtine periode krivulja struje ide kratko vrijeme horizontalno. Promjene jakosti struje su tada najmanje, t. j. jednake nuli, pa je i $e = 0$. Nakon toga su promjene jakosti struje opet veće. No ove promjene su protivnog smjera, jer jakost struje nakon $\omega t = \pi/2$ pada. Napon samoindukcije počet će opet rasti, ali sada i on u protivnom smjeru, to jest prema najvišoj pozitivnoj vrijednosti, da nakon polovine periode postigne vrijednost $+E_m$. Za vrijeme druge poluperiode (od $\omega t = \pi$ *do* $\omega t = 2\pi$) struje i pada e s najviše vrijednosti $+E_m$ opet na najnižu vrijednost $-E_m$. Ako želimo da struja i kroz zavojnicu teče, moramo na priključnice dovesti napon u, koji je uvijek protivan EMS samoindukcije. Naponi u i e moraju dakle biti *pomaknuti* u fazi za π ili 180°. Pomaknemo li (sl. 12) krivulju EMS e za π, dakle za pola periode nalijevo, ona će se pokriti s krivuljom za u.

15. — Na sl. 12. možemo dalje vidjeti, da između struje i i napona na priključnicama u postoji fazni pomak od $\pi/2$ ili 90°. Drugim riječima: *„Napon na priključnicama prethodi struji za $\pi/2$ ili 90°.“* Na sl. 12. pomaknuta je krivulja, koja pokazuje napon u, prema krivulji, koja pokazuje i, za $\pi/2$, dakle za četvrtinu periode. Jednako je točno, ako kažemo da struja zaostaje za naponom na priključnicama za $\pi/2$ ili 90°. Dogovorimo slijedeće: *„P o z i t i v a n k u t p o m a k a neka uvijek znači da s t r u j a p r e t h o d i n a p o n u“.* U tom slučaju mogli bismo ukratko reći: *„Nalazi li se u krugu izmjenične struje samo induktivitet* (bez radnog otpora), *teći će u krugu struja, koja će za $\pi/2$ ili 90° zaostajati za naponom.“* U ovome vidimo temeljnu razliku između induktiviteta i radnog otpora. Ovisnost se vidi i u v e k t o r s k o m prikazu na sl. 12. (lijevo): Zbog pomaka u fazi vektori U_m i I_m su međusobno okomiti, pa vektor I_m dolazi u smjer vektora U_m tek nakon zakreta od 90°. S istih razloga je vektor E_m pomaknut za 180° prema U_m.

16. — Djelovanje samoindukcije dade se slikovito prikazati i slijedećom usporedbom iz mehanike: U zatvorenom, zrakom napunjenom cijevnom vodu nalaze se dva čepa, koji se po cijevi mogu gibati bez trenja (sl. 13). Pomaknemo li čep K_1 naglo nalijevo stlačit ćemo zrak, koji se nalazi pred njim, jer se čep K_2 zbog t r o m o s t i ne može pod djelovanjem tlaka odmah, nego p o s t e p e n o, pomaknuti nadesno. Pomaknemo li čep K_1 nadesno, prouzrokovat će on protutlak na čep, K_2 koji se još uvijek g i b a nadesno. Radi djelovanja protutlaka čep će se p o s t e p e n o zaustaviti i onda započeti s pomicanjem nalijevo. U međuvremenu će se K_1 početi gibati opet nalijevo, te će se igra nastaviti. Na sl. 14. prikazani su ti slučajevi krivuljama. Iz njih vidimo, da brzina čepa K_2 z a o s t a j e za četvrtinu periode za tlakom čepa K_1. Uzmemo li međutim u obzir i trenje čepova sa stijenom cijevi, kao i trenje zraka, bit će zaostajenje m a n j e od četvrtine periode. U ovoj poredbi tlaku čepa K_1 odgovara momentani napon u, brzini čepa K_2 struja i, a tromosti samoindukcija L.



Sl. 13.



Sl. 14.

Ponavljanje

Kod zatvaranja kruga i s t o s m j e r n e struje, u kome se nalazi zavojnica, ne postizava struja zbog protu — EMS samoindukcije svoju konačnu vrijednost odmah, nego jakost struje raste postepeno po eksponencijalnom zakonu. Kod otvaranja kruga nastaje na mjestu prekida visoki napon iskapčanja, te se pojavljuje iskra iskapčanja, a struja pada postepeno na vrijednost nula. Usporenje kod postizavanja konačne vrijednosti ovisno je o *vremenskoj konstanti T*, te je to izrazitije, što je veće L, a manje R zavojnice (jer je $T = L/R$ [s]). Imamo li zavojnicu bez radnog otpora (čisti induktivitet) u krugu *izmjenične struje*, mora napon na priključnicama zavojnice u svakom momentu svladavati protu-EMS samoindukcije. Ova dva napona su prema tome jednaka i protivna, to jest između njih postoji *pomak u fazi* od π, odnosno 180°. Zbog samoinduktivnog djelovanja zavojnice struja, koja teče kroz zavojnicu, zaostaje za naponom na njezinim priključnicama za 90°. Između napona na priključnicama i struje postoji dakle fazni pomak od $\pi/2$ ili 90°. Pomak je *pozitivan*, ako *napon prethodi struji*. Djelovanje samoindukcije dade se usporediti s tromošću tijela u gibanju.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kakvo djelovanje ima zavojnica u krugu istosmjerne struje? *Odgovor:* Omski otpor zavojnice određuje konačnu vrijednost struje. Zbog protu-EMS samoindukcije struja kod ukapčanja postepeno raste do konačne vrijednosti, a isto tako pri iskapčanju ne padne odmah na vrijednost nula (iskre iskapčanja!). — *P.:* O čemu je ovisno usporavanje porasta, odnosno opadanja jakosti struje? *O.:* O vremenskoj konstanti $T = L/R$ [s]. — *P.:* Kako se ponaša izmjenični napon na priključnicama prema struji, koja teče kroz zavojnicu? *O.:* U slučaju, da zavojnica ima radni otpor, koji je zanemarivo malen, napon prethodi struji i između njih postoji razlika u fazi od $+\pi/2$ ili $+90°$. — *P.:* Čime se iz mehanike može usporediti pojava samoinduktivnog djelovanja zavojnice? *O.:* Tromošću tijela u gibanju.

Pitanja

5. Kada zavojnica ima induktivitet od 1 H?
6. Uslijed čega nastaju iskre iskapčanja kod otvaranja kruga istosmjerne struje?
7. U kojem smislu nastaje pomak u fazi između napona na priključnicama i struje u slučaju opterećenja kruga izmjenične struje induktivitetom?
8. Da li su struja i napon međusobno pomaknuti i u slučaju opterećenja radnim otporom?

Zadaci

4. U krugu izmjenične struje mora uz radni otpor 10 000 Ω teći struja 2 mA. Kolika mora biti tjemena, odnosno efektivna vrijednost sinusoidalnog napona na priključnicama?
5. Koliki promjer mora imati zavojnica, koja ima 50 zavoja, i dugačka je 40 mm, ako joj induktivitet mora iznositi 0,1 mH (zavojnica je bez željeza)?

6. Vremenska konstanta zavojnice, koja ima 100 Ω omskog otpora, smije biti najviše 0,1 s. Koliki smije biti induktivitet?

17. — Kad bismo u zavojnicu bez radnog otpora, t. j. s radnim otporom $R = 0$, priključili na izvor **istosmjerne** struje, struja bi postigla **neizmjerno** veliku vrijednost. No da umjesto istosmjerne struje uzmemo **izmjeničnu**, to se ne bi dogodilo, jer bi uslijed djelovanja napona samoindukcije došlo do slabljenja struje. Zavojnica djeluje dakle za izmjeničnu struju kao otpor, i njezin je otpor to veći, što je viša frekvencija f, odnosno kružna frekvencija $\omega = 2\pi f$, i induktivitet L. Ovu tvrdnju dokazuju i pokusi. Za razliku od radnog otpora R ovaj otpor za izmjeničnu struju naziva se *induktivnim otporom (induktivnim praznim otporom)* i označuje s X_L[5], a proporcionalan je kružnoj frekvenciji i induktivitetu, kako je već rečeno.[6])

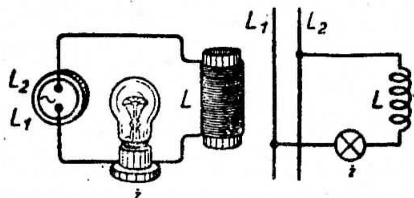
$$X_L = \omega L = 2\pi f \cdot L \quad . \quad . \quad (16)$$

Veličinu X_L dobivamo u omima (Ω), ako je ω u [1/s] (vidi jednadžbu (7) a L u [H].[7])

18. — Nalazi li se u krugu izmjenične struje samo induktivni otpor $X_L = \omega L$, opet smijemo upotrebiti Ohmov zakon, pa za efektivnu vrijednost napona na priključnicama imamo:

$$U = I \cdot X_L = I \cdot \omega L \quad . \quad . \quad (17)$$

U se naziva *induktivnim padom napona*. Slijedeći pokus jasno pokazuje razliku između otpora, što ga zavojnica pruža istosmjernoj i izmjeničnoj struji. Serijski spoj žarulje ž (sl. 15) i zavojnice L priključimo na mrežu L_1—L_2. Ako je mreža, na koju smo ovaj spoj priključili, mreža **izmjenične** struje, svijetlit će žarulja slabo ili nikako, jer dolazi do izražaja veliki X_L. Ako se radi o mreži **istosmjerne** struje, žarulja će svijetliti, kao da zavojnice i nema, ukoliko nije omski otpor prevelik. Radi svog „prigušnog" djelovanja nazivaju se zavojnice, kroz koje protječe izmjenična struja, prigušnim



Sl. 15.

---

[5]) Izraz „prazni" bit će u odsjeku 70. objašnjen pobliže.

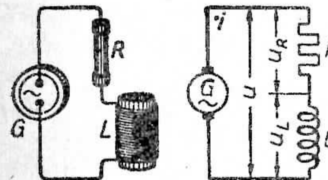
[6]) Iz $u = -e = L \cdot di/dt$ dobivamo za sinusoidalnu struju $i = I_m \cdot \sin \omega t$: $u = L \dfrac{d(I_m \cdot \sin \omega t)}{dt} = L \cdot I_m \cdot \omega \cdot \cos \omega t$. Umjesto $\cos \omega t$ možemo staviti $\sin(\omega t + \pi/2)$, pa onda imamo $u = I_m \cdot \omega L \cdot \sin(\omega t + \pi/2)$. Napon u prethodi dakle struji i za $+\pi/2$ ili $+90^0$. Za $\omega t = 0$ postaje $\sin(\omega t + \pi/2) = \sin \pi/2 = 1$, a $u = U_m$, te imamo: $U_m = I_m \cdot \omega L$ ili s efektivnim vrijednostima: $U = I \cdot \omega L$. Stavimo li za $\omega L = X_L$, dobiva jednadžba $U = I \cdot X_L$ oblik Ohmovog zakona, to jest $X_L = \omega L$ možemo smatrati otporom.

[7]) Iz jednadžbe (14) imamo naime kao veličine za L: [V] = [H·A/s] ili [H] = [V·s/A], a iz toga veličinu za X_L: [X = [1/s·Vs/A] = [V/A], to jest prema Ohmovom zakonu: [X_L] = [Ω].

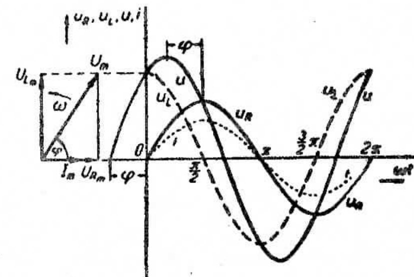
zavojnicama ili **prigušnicama**. One zauzimaju u radiotehnici vrlo važno mjesto, pa ćemo o njima kasnije govoriti opširnije.

19. — **Primjer**: Koliki je induktivni otpor zavojnice induktiviteta 100 mH (s omskim otporom, koji se može zanemariti) za struju frekvencije 50 Hz, i kolika će biti struja, ako je napon na priključnicama zavojnice 100 V? **Rješenje**: Zadano je $L = 100$ mH $= 0{,}1$ H, $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 100\pi$, $U = 100$ V. Traži se X_L i I. Iz jednadžbe (16) imamo: $X_L = \omega L = 100\pi \cdot 0{,}1 = 10\pi = 31{,}4$ Ω. Jakost struje dobivamo iz jednadžbe (17): $I = U/X_L = 100/31{,}4 = 3{,}18$ A.

20. — Pogledajmo sada kakve su prilike, ako otpor zavojnice **nije** toliko malen, da bismo ga mogli zanemariti. U ovom slučaju možemo ukupni otpor smatrati serijskim spojem otpora R i induktiviteta L (sl. 16). Da bi kroz



Sl. 16.

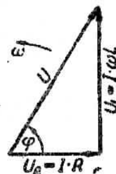


Sl. 17.

ovaj otpor struja mogla teći, mora u svakom momentu na radnom otporu postojati napon $u_R = i \cdot R$, a na induktivitetu napon $u_L = i \cdot \omega L$. Pad napona na radnom otporu je prema odsjeku 10. u fazi sa strujom. Pad napona na induktivitetu je prema odsjeku 14. u svakom momentu pomaknut prema struji i za 90^0 naprijed. Zbroj obiju *momentanih* vrijednosti u_R *i* u_L daje *momentanu* vrijednost napona na priključnicama u. Nacrtamo li obje sinusoide, koje prikazuju u_R, odnosno u_L, pazeći na pomak u fazi (sl. 17), pa za svaki ωt načinimo zbroj momentanih vrijednosti, dobivamo *sinusoidu*, koja nam pokazuje napon u na priključnicama. Ako momentane vrijednosti u_R *i* u_L nisu istog predznaka, moraju se njihove vrijednosti, naravno, odbiti. Zbrojem dobivena sinusoida smještena je vremenski između sinusoide, koja prikazuje u_R, i one, koja prikazuje u_L. Kako vidimo iz sl. 17. *pomak u fazi* φ između napona u na priključnicama i struje i *manji* je od 90^0. Iz toga možemo izvesti slijedeći zaključak: *„Ako se u krugu izmjenične struje nalazi radni i induktivni otpor, tada je napon na priključnicama ovoga spoja prema struji pomaknut naprijed za kut φ manji od π/2 odnosno 90⁰."*

21. — Ove rezultate dobili smo iz krivulja na sl. 17. Crtanje ovih krivulja bilo je sada već teže. **Vektorskim** prikazom dolazimo do cilja mnogo jednostavnije, a usto možemo dobiti vrlo važne jednadžbe, koje iz prikaza krivuljama bez daljnjega ne bismo mogli postaviti. U vektorskom

prikazu na sl. 17. lijevo nacrtan je vektor napona U_{Rm} horizontalno, to jest u fazi sa strujom I_m, dok je vektor napona U_{Lm} nacrtan okomito, jer prethodi struji I_m za 90°. Prema općenitom zakonu paralelograma (paralelograma sila!), oba se vektora U_{Rm} i U_{Lm} sastavljaju u rezultantni vektor U_m. Ovaj postupak sastavljanja naziva se, za razliku od *algebarskog, geometrijsko* ili *vektorsko zbrajanje*. Mjerenjem se možemo uvjeriti, da se duljina vektora U_m dobivena na ovaj način potpuno slaže s vrijednošću iz krivulje, koja prikazuje u. Vektorski prikaz pokazuje nam dalje, da je napon U_m na priključnicama prema struji I_m pomaknut naprijed za kut φ. Vektorski prikaz daje nam još i više: daje nam mogućnost, da postavimo jednadžbe, iz kojih možemo izračunati veličinu faznog pomaka. Iz trokuta imamo:



Sl. 18.

$tg\ \varphi = \frac{U_{Lm}}{U_{Rm}} = \frac{I_m \cdot \omega L}{I_m \cdot R}$, to jest:

$$tg\,\varphi = \frac{\omega L}{R} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (18)$$

Za $R = 0$ imamo $tg\varphi = \omega L/0 = \infty$, dakle $\varphi = 90^0$ (slučaj čistog induktivnog opterećenja): Za $L = 0$ postaje $tg\varphi = 0/R = 0$, dakle $\varphi = 0^0$ (slučaj čistog omskog opterećenja).

22. — Prije smo za *momentane* vrijednosti postavili, da je $u = u_R + u_L$. Ipak bi bilo krivo zaključiti, da se također tjemene i efektivne vrijednosti mogu algebarski zbrajati. Kako jasno izlazi, iz vektorskog prikaza za tjemene vrijednosti vrijedi $U_m^2 = U_{Rm}^2 + U_{Lm}^2$, odnosno za efektivne vrijednosti: $U^2 = U_R^2 + U_L^2$. Odavde imamo:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (19)$$

Sve ovo se može još pojednostavniti, ako ne crtamo cijeli paralelogram, nego samo jedan njegov trokut (trokut sila u mehanici!). U desnom trokutu (sl. 17) je naime okomita kateta po veličini i smjeru jednaka U_{Lm}. Tako dobivamo *trokut*, koji je na sl. 18. nacrtan za efektivne vrijednosti. Ovaj trokut može se dakako nacrtati i za tjemene vrijednosti, i to tako, da se stranice U_{Rm} i U_{Lm} nacrtaju 1,41 puta dulje. Potrebno je primijetiti, da je smjer hipotenuze protivan smjeru obilaženja kateta.

Ponavljanje

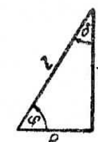
Zavojnica bez radnog otpora s induktivitetom L predstavlja za izmjeničnu struju kružne frekvencije ω *induktivni otpor* $X_L = \omega L$ [Ω], te je prema Ohmovom zakonu: $U = I \cdot X_L = I \cdot \omega L$. Što je viša frekvencija struje, to jače zavojnica struju prigušuje, to jače djeluje ona kao *prigušnica*. Ako se radni otpor zavojnice ne može zanemariti, prethodit će napon struji za kut manji od $\pi/2$, odnosno manji od 90°. Fazni pomak se dade izračunati iz jednadžbe: $tg\varphi = \omega L/R$. Ukupni napon na priključnicama dobiva se kao *geometrijski zbroj* napona na priključnicama otpora i napona na priključnicama induktiviteta. *Momentana vrijednost* napona na priključnicama spoja jednaka je

zbroju momentanih vrijednosti u_R i u_L. Ovakvo *algebarsko* zbrajanje ne vrijedi za tjemene i efektivne vrijednosti. Za ove vrijednosti vrijedi: $U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$ ako U_R i U_L označuju efektivne vrijednosti pojedinačnih napona na otporu i induktivitetu.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kako zavojnica djeluje kao „prigušnica" u krugu izmjenične struje? *Odgovor:* Zavojnica pruža izmjeničnoj struji otpor, koji ne pruža istosmjernoj struji. Ovaj induktivni otpor je to veći, što je viša frekvencija struje i induktivitet zavojnice. — *P.:* Kako se može izračunati napon na priključnicama prigušnice? *O.:* Prema Ohmovom zakonu je napon na priključnicama jednak umnošku struje, koja teče kroz zavojnicu i induktivnog otpora $(U = I \cdot \omega L)$; u slučaju da se radni otpor zavojnice može zanemariti. — *P.:* Kakve su prilike kod zavojnice, koja uz induktivitet L ima i radni otpor R? *O.:* I u ovom slučaju napon prethodi struji, samo je sada kut manji od 90°. — *P.:* Kako se u tom slučaju može izračunati fazni kut? *O.:* Iz jednadžbe $tg\varphi = \omega L/R$. — *P.:* Iz čega se ova jednadžba može lako izvesti? *O.:* Iz trokuta u vektorskom prikazu. — *P.:* Kako se sastavlja ukupni napon na priključnicama od djelomičnih napona na otporu R i induktivitetu L? *O.:* Za momentane vrijednosti vrijedi: $u = u_R + u_L$, a za efektivne vrijednosti: $U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$.

23. — Isto onako, kao što smo na sl. 18. postavili trokut za n a p o n e, možemo postaviti i trokut za o t p o r e u krugu izmjenične struje. Izrazi za napone $U_R = I \cdot R$ i $U_L = I \cdot \omega L$ razlikuju se naime od izraza za otpore samo po faktoru I. Nacrtajmo dakle horizontalno, kao jednu katetu, radni otpor R, a okomito na nju u istom mjerilu induktivni otpor X_L kao drugu katetu (sl. 19). Nacrtavši hipotenuzu Z dobivamo trokut, iz kojeg lako možemo izračunati veličinu hipotenuze kao vrijednost ukupnog otpora Z serijskog spoja R i L. Za Z imamo:



Sl. 19.

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad . \quad . \quad . \quad (20)$$

Z se naziva, za razliku od radnog i induktivnog otpora, *prividni otpor* ili *impedancija* kruga izmjenične struje. Za $R = 0$ imamo opet $Z = X_L = \omega L$ (vidi jednadžbu (16), a za $\omega L = 0$ ukupni je otpor $Z = R$. I sada smijemo primijeniti Ohmov zakon, ako za otpor uvrstimo vrijednosti iz jednadžbe (20). Za efektivne vrijednosti imamo u tom slučaju:

$$U = I \cdot Z = I \cdot \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad . \quad . \quad (21)$$

Za fazni pomak φ dobivamo iz trokuta otpora već otprije poznatu vrijednost za $tg\varphi$ (vidi jednadžbu (18). Vidimo opet da nam vektorski prikaz omogućuje postavljanje jednadžbi, do kojih bismo isključivo računskim putem došli mnogo teže.

24. — P r i m j e r: U jednom prijemniku imamo prigušnicu s induktivitetom $L = 10$ H i omskim otporom $R = 1\,000\ \Omega$. Kolika je impedancija ove prigušnice za frekvenciju $f = 50$ Hz, i koliki će biti pomak između struje, koja teče kroz prigušnicu, i napona na priključnicama?

R j e š e n j e: Zadani su $R = 1000\ \Omega$, $L = 10$ H, $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 100\pi$, a traži se Z i φ. Iz jednadžbe (20) imamo: $Z = \sqrt{1000^2 + (100 \cdot \pi \cdot 10)^2} = \sqrt{1000000 + 9869600} = \sqrt{10869600} = 3297\ \Omega$. Dalje imamo iz jednadžbe (18): $tg\ \varphi = \omega L/R = 1000\ \pi/1000 = \pi = 3{,}1416$, t. j. $\varphi = 72^\circ 21'$.

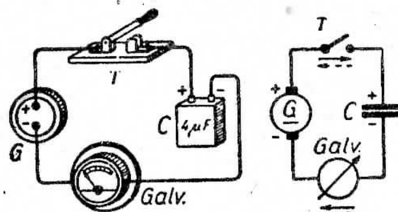
25. — U većini slučajeva je o m s k i otpor zavojnice nepoželjan, jer se u njemu jedan dio električne energije pretvara u toplinu. *Gubici u zavojnici* ovise o njezinom ukupnom radnom otporu R. Znamo (vidi odsjek 7 i 8), da kod izmjeničnih struja s k i n - e f e k t i v r t l o ž n e struje pridonose povećanju otpora. Osim toga kod viših frekvencija može doći do većih gubitaka radi loše i z o l a c i j e zavojnice i nosača, na koji su smješteni zavoji. Daljnji izvor gubitaka su i z b i j a n j a između pojedinih zavoja ili pojedinih slojeva, a ta mogu dovesti i do stvaranja luka. Ako zavojnica ima željeznu jezgru, dolazi još i do gubitaka uslijed h i s t e r e z e i v r t l o ž n i h struja, pa i njih treba uračunati. Posve je jasno, da će svi ovi gubici biti to veći, što je viša frekvencija izmjenične struje, o kojoj se radi. Na ovo ćemo međutim doći kasnije. Kao mjerilo za gubitke služi kut gubitaka δ, odnosno tangens toga kuta: $tg\ \delta$. Iz sl. 19. slijedi: $tg\ \delta = tg\ (90^\circ - \varphi) = cotg\ \varphi = 1/tg\ \varphi$, to jest:

$$tg\ \delta = \frac{1}{tg\ \varphi} = \frac{R}{\omega L} \quad \ldots \quad (22)$$

Tangens kuta gubitaka je dakle uz danu frekvenciju f to manji, što je manji radni otpor R i što je veći induktivitet L zavojnice. Za dobre zavojnice $tg\ \delta$ se kreće između vrijednosti 0,002 i 0,005 (kod 1 MHz).

Kapacitet u krugu istosmjerne struje

26. — Kondenzator u krugu i s t o s m j e r n e struje predstavlja prekid kruga, to jest on je neizmjerno velik otpor. Priključimo li kondenzator C na izvor istosmjerne struje G (na primjer na akumulatorsku bateriju) prema sl. 20, *u momentu ukapčanja* poteći će kratkotrajna struja, koju će galvanometar uključen u krug pokazati kao udarac struje. Ovaj udarac traje međutim samo tako dugo, dok napon na priključnicama kondenzatora ne poprimi vrijednost napona baterije. Razjašnjenje za to je jednostavno: Negativni pol izvora istosmjerne struje tlači elektrone na jedan oblog kondenzatora, dok pozitivni pol s drugog obloga istu količinu elektrona siše.

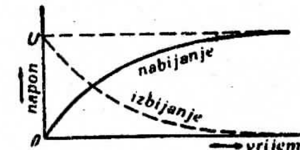


Sl. 20.

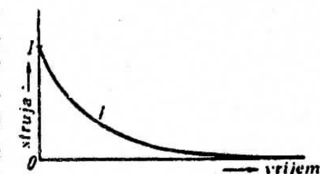
Puna strelica na sl. 20 pokazuje smjer elektronske struje, a puna naznačuje... Crtkana strelica na sl. 20 pokazuje smjer elektronske struje, a puna naznačuje onaj smjer, koji se obično uzima kao smjer struje. (Vidimo, da je smjer gibanja elektrona protivan smjeru, koji se općenito uzima kao smjer toka struje). Množina elektriciteta Q, koja se nalazi na svakom oblogu, može se izračunati iz poznatog odnosa: $Q = C \cdot U$, gde je C kapacitet u „faradima" [F], a U napon na priključnicama u „voltima" [V]; Q dobivamo u „kulonima" (Coulomb [C]).

27. — Ako je izolacija dobra, zadrži se naboj na pločama kondenzatora još dugo i nakon iskapčanja baterije, te se tek postepeno preko zraka odvodi. Zbog toga se događa, da još dugo i nakon toga, što smo kondenzator od izvora struje odvojili, dodirom obaju polova kondenzatora dobivamo naponski udarac. Ako pak nabijeni kondenzator spojimo kratko, nastaje kratki udarac struje. Pri tome se naboji na oblozima kondenzatora izjednače strujom i z b i j a n j a, koja je po smjeru protivna struji nabijanja.

28. — Svaki kondenzator, baš kao i zavojnica sa svojim induktivitetom (vidi odsjek 12 i 13) ima stanovitu tromost. Napon na kondenzatoru raste naime kod ukapčanja postepeno do pune vrijednosti, a isto tako (sl. 21) kod izbijanja postepeno pada na vrijednost nula. Proces nabijanja i izbijanja traje to dulje, što je *vremenska konstanta* $T = R \cdot C$ kondenzatora veća, to jest što je veći omski otpor u krugu i što je veći kapacitet kondenzatora. Struja nabijanja i opada s konačne vrijednosti I na vrijednost 0 po eksponencijalnom zakonu (sl. 22). Tako na primjer jakost struje nabijanja, odnosno izbijanja, nakon vremena $t = 7\ T = 7 \cdot R \cdot C$ [s] iznosi samo još 1/1000 one vrijednosti struje, koja je bila u momentu ukapčanja, odnosno kratkog spajanja kondenzatora. Kondenzator je nakon toga vremena praktički nabijen, odnosno izbijen. Iz računa se dalje može vidjeti, da napon nakon vremena $t = 3\ T = 3 \cdot R \cdot C$ [s] padne na 5% svoje početne vrijednosti, odnosno poraste na 95% svoje konačne vrijednosti. K a p a c i t i v n a vremenska konstanta je vrlo važna veličina u radiotehnici.



Sl. 21.



Sl. 22.

Ponavljanje

Prividni otpor ili *impedancija* serijskog spoja induktiviteta L i radnog otpora R je $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$. Otpori za izmjeničnu struju mogu se kao i naponi zbrajati geometrijski, to jest mogu se sastaviti u *trokut*. Ohmov zakon vrijedi i za serijski spoj otpora i induktiviteta. Tada je $U = I \cdot Z = I \cdot \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$. U svakoj zavojnici dolazi (naročito kod viših frekvencija) do gubitaka, koji su uzrokovani radnim otporom (omski otpor, skin-efekt, vrtložne struje), lošom izolacijom, isijavanjem i kod zavojnica sa željeznom jezgrom gubicima u željezu. Kut gubitaka, odnosno tangens kuta gubitaka $tg\ \delta = 1/tg\ \varphi = R/\omega L$ mjerilo je za gubitke.

Priključimo li *kondenzator* na izvor istosmjerne struje, poteći će u momentu ukapčanja kroz krug kratki udarac struje nabijanja, a isto tako poteče i kod kratkog spoja obloga kondenzatora kratka struja izbijanja. Trajanje nabijanja, odnosno izbijanja, ovisno je o *vremenskoj konstanti* $T = R \cdot C$ [s]. Nabijanje, odnosno izbijanje, bit će završeno to prije, što su radni otpor i kapacitet manji.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Koliki je prividni otpor zavojnice, kod koje radni otpor ne možemo zanemariti? *Odgovor:* $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$. — *P.:* Kako se ova jednadžba može najjednostavnije izvesti? *O.:* Iz trokuta otpora. — *P.:* Vrijedi li Ohmov zakon i za ovaj slučaj? *O.:* Da, samo kao otpor mora biti uvršten prividni otpor *Z*. — *P.:* Koje pojave uvjetuju gubitke u zavojnicama? *O.:* Omski opor, skin-efekt, vrtložne struje, loša izolacija, isijavanje i premagnetiziranje željezne jezgre kod zavojnice sa željeznom jezgrom. — *P.:* Što razumijevamo pod kutom gubitaka? *O.:* Kut gubitaka je mjerilo za gubitke. — *P.:* Kako se mijenja napon na priključnicama kondenzatora kod nabijanja, odnosno kod izbijanja? *O.:* Napon na priključnicama kod nabijanja postepeno raste po eksponencijalnom zakonu do konačne vrijednosti (do napona izvora), a isto tako kod izbijanja pada po istom zakonu na vrijednost nula. — *P.:* Čime je određeno vrijeme nabijanja, odnosno izbijanja kondenzatora? *O.:* Vremenskom konstantom $T = R \cdot C$ [s].

Pitanja

9. Čime se kod zavojnica s otporom može povećati fazni pomak?
10. Koje se sinusoidalne veličine smiju zbrajati algebarski, a koje se moraju zbrajati geometrijski?
11. Čime se razlikuje prividni otpor zavojnice od induktivnog otpora?
12. Kako se izračunava kut gubitaka zavojnice?

Zadaci

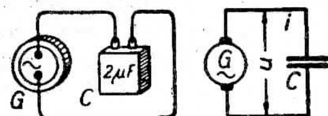
7. Zavojnica s induktivitetom 5 H mora kod tonske frekvencije 1 000 Hz imati impedanciju točno 50 kΩ. Koliki joj mora biti radni otpor?

8. Zavojnica s radnim otporom 2 kΩ priključena je na izmjenični napon 50 V, 50 Hz, i pri tome kroz nju teče struja 10 mA (vrijednost struje i napona je efektivna). Koliki je a) prividni otpor, b) induktivitet, c) fazni pomak, d) kut gubitaka?

9. U serijskom spoju radnog otpora 50 Ω i zavojnice s induktivitetom 60 µH na zavojnici mora nastati induktivni pad napona 5 mV Koliki mora biti ukupni napon na priključnicama, ako se radi o struji s kružnom frekvencijom 10^6, i koliki će biti pad napona na radnom otporu?

Kapacitet u krugu izmjenične struje

29. — Priključimo li na oba pola kondenzatora *C* izmjenični napon iz generatora *G* (sl. 23), kondenzator će se za vrijeme prve poluperiode izmjeničnog napona nabijati. Nabijanje je završeno, kad je napon na priključnicama kondenzatora jednak naponu generatora. Za vrijeme druge poluperiode izmjenični napon ima protivan smjer. Kondenzator će se zato najprije izbiti, a zatim nabiti u p r o t i v n o m smjeru. Ova igra se neprestano ponavlja i u slijedećim poluperiodama, te se polaritet napona na kondenzatoru neprestano mijenja. U krugu sastavljenom od *C* i *G* mora dakle trajno teći struja nabijanja, odnosno izbijanja, mijenjajući smjer. Ukopčamo li u krug struje, na bilo kojem mjestu, ampermetar za izmjeničnu struju, možemo zaista utvrditi ne samo jednokratni strujni udarac ukapčanja (vidi odsjek 26), nego trajnu struju. No kako struja može teći samo u zatvorenom krugu, moramo uzeti da *i z m j e n i č n a s t r u j a*, baš pro-

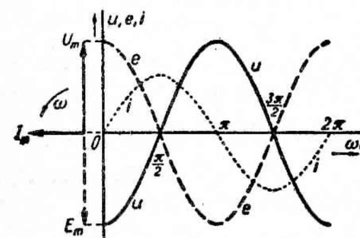


Sl. 23.

tivno od istosmjerne, *prolazi kroz kondenzator*, da teče dakle i kroz dielektrikum (izolator između ploča kondenzatora)!

30. — Razjašnjenje za ovu činjenicu nalazimo u tome, što u svakoj materiji ima slobodnih elektrona. Elektroni se međutim mogu slobodno gibati samo u električkom vodiču. U izolatoru su elektroni elastično vezani na položaj mirovanja, te mogu izvoditi tek neznatne pomake. Privlačna sila električkog polja nabijenog kondenzatora pomiče elektrone iz stanja mirovanja i na neki način ih usmjeruje. Radi toga govorimo o d i e l e k t r i č k o m pomaku unutar dielektrikuma. No, ma kako maleno bilo pomicanje elektrona, ipak ono predstavlja električnu struju. Zato ovaj pomak elektrona možemo nazvati p o m a č n o m s t r u j o m. Ta struja predstavlja ustvari nastavak struje nabijanja, odnosno izbijanja, koja teče u priključnim vodovima kondenzatora.

31. — Sada ćemo pobliže razmotriti odnos struje i napona kod kondenzatora kapaciteta *C* priključenog na izmjenični napon. Pri tome ćemo se opet poslužiti krivuljama i vektorskim slikama, ne vodeći računa o pojavama pri ukapčanju. Pogledajmo najprije krivulje (sl. 24): naše razmatranje započet ćemo u momentu, kad priključeni napon *u* prolazi kroz svoju najvišu negativnu vrijednost $-U_m$. Tada je kondenzator nabijen i više nema nikakvog dielektričkog pomaka, te je struja nabijanja $i = 0$. Postaje li negativni napon na priključnicama za vrijeme prve četvrtine periode niži, kondenzator će se pomalo izbijati. Budući da se elektroni sada vraćaju u svoj položaj mirovanja, počinje teći struja izbijanja *i*, koja sada ima smjer protivan smjeru napona na priključnicama. Na koncu prve četvrtine periode, dakle kod $\omega t = \pi/2$, napon na priključnicama pada na nulu, a kondenzator se posve izbija. U ovom momentu elektroni prolaze najvećom brzinom kroz položaj, u kojem se nalaze za mirovanja, pa struja izbijanja *i* postiže svoju najvišu pozitivnu vrijednost $+I_m$. Sada napon na priključnicama *u* mijenja svoj smjer i penje se za vrijeme druge četvrtine periode na najvišu pozitivnu vrijednost $+U_m$. Za ovo vrijeme su se elektroni već pomakli iz stanja mirovanja i gibaju se dalje na drugu stranu: kondenzator se nabija dakle u protivnom smjeru. Jakost pomačne struje, koja teče još uvijek u istom smjeru, ali sada kao struja nabijanja *i*, opada do vrijednosti nula, što znači da je prvi polutitraj ovog njihanja elektrona završen. Na kraju druge četvrtine periode, dakle kod $\omega t = \pi$, napon na priključnicama postiže maksimalnu pozitivnu vrijednost $+U_m$, dok struja nabijanja pada na vrijednost nula. U obje slijedeće četvrtine periode ponavlja se isti proces u protivnom smjeru. Kondenzator se u trećoj četvrtini periode izbija (i postiže najvišu negativnu vrijednost $-I_m$), a u četvrtoj se nabija u protivnom smjeru (za $u = -U_m$ poprima *i* vrijednost 0).



Sl. 24.

32. — Na pločama nabijenog kondenzatora djeluje protunapon *e*. Da izmjenična struja *i* može uopće teći, priključeni napon *u* u svakom momentu

mora svladati ovaj protunapon, mora biti dakle protivnog smjera. Prema tome vrijedi odnos: $e = -u$. Između ova dva napona mora dakle postojati razlika u fazi točno π ili 180° (vidi odsjek 14). Na sl. 24. nacrtan je također i tok protunapona e. Iz krivulja na istoj slici možemo dalje spoznati vrlo važnu činjenicu: struja i, koja teče kroz kondenzator, prethodi naponu u na priključnicama za $\pi/2$ ili 90°. Prilike su dakle kod kapaciteta upravo obrnute od onih kod induktiviteta (vidi sl. 12. i odsjek 15). Došli smo do ovog zakona: *„Imamo li u krugu izmjenične struje kapacitet bez radnog otpora, prethodit će struja naponu na priključnicama za $\pi/2$ ili 90°."* Možemo reći i obrnuto: da će napon na priključnicama zaostajati za strujom za $\pi/2$ ili 90°. Prema dogovoru u odsjeku 15, kut faznog pomaka moramo uzeti negativnim: $\varphi = -\pi/2$ ili $-90°$.

33. — Svi ovi odnosi mogu se lijepo vidjeti i u vektorskom prikazu (sl. 24. lijevo). Budući da struja i prethodi naponu u za jednu četvrtinu periode, oba vektora I_m i U_m nacrtana su jedan na drugi okomito. Ako je dakle U_m vertikalan i sa smjerom prema gore, vektor I_m mora biti horizontalan i sa smjerom nalijevo. Vektor E_m je zbog protivnosti u fazi crtan u smjeru protivnom od U_m.

Ponavljanje

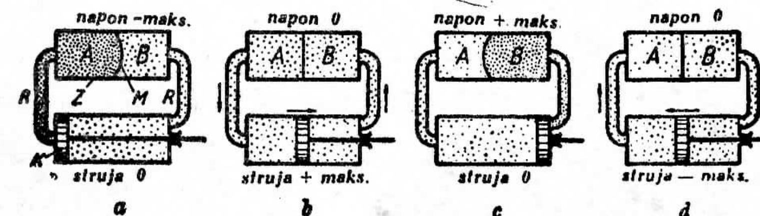
Kondenzator u krugu istosmjerne struje predstavlja prekid kruga, dok izmjeničnu struju propušta. U dielektrikumu kondenzatora nastaje *dielektrički pomak* slobodnih elektrona, pa je prema tome struja, koja teče kroz kondenzator, *pomačna struja* elektrona. Kod kondenzatora, koji nema radnog otpora, struja prethodi naponu za četvrtinu periode. Protunapon uzrokovan nabojem kondenzatora obzirom na fazu protivan je priključenom naponu.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kako se kondenzator ponaša kod izmjenične struje, a kako kod istosmjerne? *Odgovor:* Kondenzator bez gubitaka za istosmjernu struju predstavlja prekid kruga, a u krugu izmjenične struje kondenzator se ponaša kao vodič. — *P.:* Kako se može objasniti tok izmjenične struje kroz dielektrikum kondenzatora? *O.:* Kao „dielektrički pomak" slobodnih elektrona dielektrikuma. Elektroni pod djelovanjem izmjeničnog polja titraju oko svog stanja mirovanja, uslijed čega nastaje pomačna struja. — *P.:* Koji odnos postoji između izmjeničnog napona na priključnicama kondenzatora i struje, koja teče krozanj? *O.:* Između napona na priključnicama i struje postoji razlika u fazi od četvrtine periode. Napon na priključnicama zaostaje za strujom za $\pi/2$ ili 90°. — *P.:* Kakav predznak ima fazni kut kod kondenzatora bez radnog otpora? *O.:* Prema dogovoru negativni, jer napon na priključnicama zaostaje za strujom.

34. — Da bolje razumijemo, kako djeluje kapacitet u krugu izmjenične struje, postavit ćemo jednu u s p o r e d b u i z m e h a n i k e. Zrakom napunjen cilindar Z (sl. 25) razdijeljen je elastičnom nepropusnom gumenom membranom M na dvije jednake komore A i B, i s obje strane vezan sa sisaljkom cijevima R. U sisaljci se bez trenja giba nepropusni čep K. Stoji li u početku čep K u sredini cilindra, u obim komorama vladat će isti tlak, te

membrana ne će biti udubljena (sl. 25. d). Giba li se čep K nalijevo, on tlači zrak u komoru A i siše zrak iz komore B. Zato se membrana M udubljuje nadesno. Za vrijeme ovog procesa struji zrak kroz obje cijevi R (sl. 25. d). Ova struja zraka prestaje, kad je tlak u komori A jednak tlaku, što ga uzrokuje čep (sl. 25. a). U tom momentu je membrana najjače napeta. Krene li



Sl. 25.

sada čep na drugu stranu, zrak struji iz komore A i tlak membrane popušta. U srednjem položaju čepa (sl. 25. b) imamo u obje komore isti tlak, pa je napon membrane jednak nuli. U tom momentu zrak struji najvećom brzinom kroz cijevi R. Što se čep giba dalje nadesno iz svog srednjeg položaja, to se više razrjeđuje zrak u komori A i zgušćuje u komori B; brzina zraka u cijevima R opada. U desnom krajnjem položaju čepa (sl. 25. c) napon membrane je opet najveći (ali u protivnom smjeru), dok struja zraka u cijevima ima sada vrijednost nula. Kad se čep vraća nalijevo, zrak opet struji iz komore B, a s druge strane struji u komoru A. U srednjem položaju zrak ima najveću brzinu, a napon membrane postaje opet jednak nuli. Vidimo dakle, da zrak u obje cijevi R struji kao izmjenična struja. Zračne komore predstavljaju obloge kondenzatora, membrana dielektrikum, a sisaljka s čepom odgovara generatoru izmjenične struje. Stanje prikazano sl. 25.-a odgovara nabijenom kondenzatoru (vidi sl. 24. za $\omega t = 0$), stanje na sl. 25.-b izbijenom kondenzatoru (za $\omega t = \pi/2$). Sl. 25.-c može se usporediti s kondenzatorom nabijenim u protivnom smjeru (za $\omega t = \pi$), a sl. 25.-d s kondenzatorom, koji se ponovo izbio (za $\omega t = 3\pi/2$). I u mehaničkoj usporedbi jasno se dakle pokazalo, da struja (gibanje zraka) prethodi naponu priključnica (napon membrane) za četvrtinu periode. Udubljivanje membrane može se usporediti s dielektričkim pomakom. Ako zrak i ne prolazi kroz membranu, ipak gibanje membrane u neku ruku predstavlja nastavak gibanja zraka iz jedne komore u drugu.

35. — Iz mehaničke usporedbe možemo osim toga, uz pretpostavku da se čep, kao i zrak, giba bez otpora, zaključiti još i više. Što je veći sadržaj komora i što je veća podatnost membrane, to veća će biti brzina strujanja zraka u cijevima uz i s t i t l a k č e p a. Ova činjenica primijenjena na kondenzator znači, da će kapacitivna struja biti to j a č a, što je veći kapacitet kondenzatora. Jača struja odgovara, međutim, prema Ohmovom zakonu, manjem otporu. Giba li se čep uz inače iste odnose na primjer tri puta tako često u sekundi na jednu i drugu stranu, povisimo li dakle frekvenciju čepa na trostruko, u to će vrijeme kroz cijev proći

tri puta tako velika količina zraka. Time se je dakle jakost zračne struje također potrostručila. Prevedeno u elektriku to znači: otpor, što ga kondenzator pruža izmjeničnoj struji, to je manji, što je frekvencija struje više. Točni računi daju za ovaj kapacitivni otpor (kapacitivni prazni otpor) X_C kondenzatora kapaciteta C važnu jednadžbu:

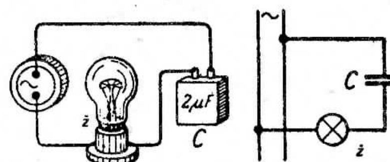
$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \quad . \; . \; . \; (23)$$

X_C[8]) je dakle obrnuto proporcionalan[9]) kružnoj frekvenciji ω i kapacitetu C. Induktivni otpor X_L zavojnice je naprotiv prema odsjeku 17. direktno proporcionalan kružnoj frekvenciji.

36. — Imamo li u krugu izmjenične struje samo kapacitivni otpor X_C, smijemo primijeniti Ohmov zakon, te za efektivnu vrijednost napona na priključnicama imamo:

$$U = I \cdot X_C = \frac{I}{\omega C} \quad . \; . \; . \; (24)$$

U je u ovom slučaju *kapacitivni pad napona*. Ukopčamo li na primjer žarulju $\check{Z}$ (sl. 26) u seriju s kondenzatorom C na izmjenični napon, teći će struja kroz žarulju i kroz kondenzator. Na žarulji nastaje radni pad napona (vidi odsjek 39). Već prema veličini kapaciteta kondenzatora njegov otpor izmjeničnoj struji ima razne vrijednosti, te će žarulja svijetliti jače ili slabije.



Sl. 26.

[8]) Da bismo X_C dobili u omima [Ω], moramo C uvrstiti u faradima [F]. Pri tome se moramo sjetiti, da je jedan farad $= 1$ F $= 9 \cdot 10^{11}$ cm, jedan mikrofarad $= 1$ μF $= 10^{-6}$ F $= 9 \cdot 10^5$ cm, a 1 pikofarad $= 1$ pF $= 10^{-12}$ F $= 10^{-6}$ μF $= 0{,}9$ cm.

[9]) Za one, koji su u matematici napredniji, dajemo točan izvod jednadžbe (23). Momentana količina elektriciteta q na pločama kondenzatora je: $q = u \cdot C$. Za struju, koja bi imala stalno istu vrijednost I, vrijedilo bi: $q = i \cdot t$. Kod struje promjenljive jakosti ovaj produkt vrijedi samo za vrlo kratak odsjek vremena dt. Momentana ukupna količina naboja je dakle: $q = i \cdot dt$. Iz toga onda slijedi:

$$u = \frac{q}{C} = \frac{1}{C}\int i \cdot dt = \frac{1}{C}\int I_m \cdot \sin \omega t \cdot dt = -\frac{I_m}{\omega C} \cdot \cos \omega t$$

Konstanta integracije je jednaka 0, jer je $u = 0$ za $\omega t = \pi/2$. Zbog $\cos \omega t = -\sin(\omega t - \pi/2)$ slijedi: $u = \frac{I_m}{\omega C} \cdot \sin(\omega t - \pi/2)$. Napon na priključnicama u zaostaje dakle za $\pi/2$, odnosno za 90° iza struje i. Za $\omega t = \pi$ (prema sl. 24) imamo $u = U_m$, što znači: $U_m = \frac{I_m}{\omega C} \cdot \sin(\pi - \pi/2)$ ili $U_m = I_m/\omega C$, odnosno za efektivne vrijednosti $U = I/\omega C$. Stavimo li $1/\omega C = X_C$, imamo oblik Ohmovog zakona $U = I \cdot X_C$. $X_C = 1/\omega C$ možemo dakle smatrati otporom.

37. — Primjer: U visokofrekventnom stupnju prijemnika nalazi se kondenzator bez gubitaka s kapacitetom 100 pF. Koliki je njegov kapacitivni otpor za 1 MHz (visoka frekvencija) i za 5 kHz (niska frekvencija)? Rješenje: Zadano je: $C = 100$ pF $= 100 \cdot 10^{-12}$ F, $f = 1$ MHz $= 10^6$Hz, odnosno 5 kHz $= 5 \cdot 10^3$ Hz; traži se X_C. Iz jednadžbe (23) imamo: $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^6 \cdot 10^{-10}} = \frac{10^4}{2\pi} = 1592$ Ω, odnosno $\frac{1}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 10^{-10}} = \frac{10^6}{\pi} = 318310$ Ω. Za nisku frekvenciju predstavlja kondenzator dakle velik, a za visoku vrlo malen otpor.

Ponavljanje

Djelovanje kapaciteta u krugu izmjenične struje može se u mehanici usporediti s uređajem sa sisaljkom. Svaki kondenzator kapaciteta C pruža izmjeničnoj struji kapacitivni otpor X_C, koji je obrnuto proporcionalan kružnoj frekvenciji i kapacitetu ($X_C = 1/\omega C$). Ako kroz kondenzator teče izmjenična struja, na njegovim polovima nastaje kapacitivni pad napona $U = I/\omega C$.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Koji električki pojmovi odgovaraju pojmovima iz usporedbe sa sisaljkom, kad se radi o kapacitetu u krugu izmjenične struje? *Odgovor:* Sisaljka s čepom odgovara generatoru izmjenične struje, zrak, koji se giba na jednu i na drugu stranu, odgovara izmjeničnoj struji, zračne komore oblozima kondenzatora, membrana dielektrikumu kondenzatora, a elastično gibanje membrane dielektričkom pomaku. — *P.:* Kako se kapacitivni otpor kondenzatora može držati malenim? *O.:* Kod dane frekvencije što većim kapacitetom, kod danog kapaciteta što većom frekvencijom. — *P.:* Što razumijemo pod „kapacitivnim padom napona"? *O.:* To je napon na priključnicama kondenzatora, kroz koji teča izmjenična struja. — *P.:* Kako možemo izračunati kapacitivni pad napona? *O.:* Prema Ohmovom zakonu, ako otporom smatramo kapacitivni otpor kondenzatora: $U = I/\omega C$.

Pitanja

13. Koliki je kut faznog pomaka kod čistog kapacitivnog otpora?

14. U kojim praktičkim jedinicama mjerimo kapacitet kondenzatora i u kojem odnosu stoje te jedinice?

15. Kako je ovisan induktivni otpor zavojnice i kapacitivni otpor kondenzatora o frekvenciji izmjenične struje?

Zadaci

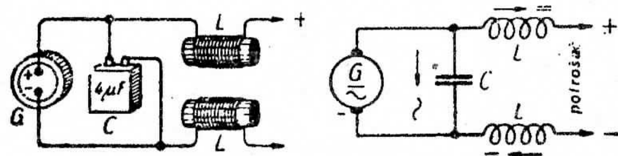
10. Koliki izmjenični otpor ima kondenzator kapaciteta 1 μF kod 50 Hz, 1 kHz i 1 MHz?

11. Kondenzator kapaciteta 10 000 pF priključen je na mrežu izmjenične struje, koja ima napon 220 V i frekvenciju 50 Hz. Kolika je jakost struje, koja teče kroz kondenzator?

12. Koliki mora biti kapacitet kondenzatora, kakav se upotrebljava u slučaju, kad rasvjetna mreža služi kao antena, ako kapacitivni otpor toga kondenzatora kod 150 kHz ne smije biti veći od 1 kΩ?

38. — Suprotno ponašanje induktiviteta i kapaciteta kod prolaza izmjenične struje u radiotehnici se vrlo često iskorišćuje. Stoga ćemo već sada

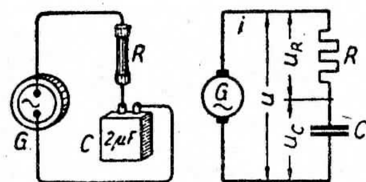
upoznati jedan takav slučaj. Radi se o takozvanom f i l t e r u (sl. 27). Tu je G generator, koji daje istosmjernu i izmjeničnu struju, dakle pulzirajuću struju. Ovakvu struju možemo smatrati istosmjernom, kojoj je dodana izmjenična. Zbog malenog otpora prigušnih zavojnica L istosmjerni dio struje ide k potrošaču nesmetano, dok izmjenični dio ide kroz kondenzator C, koji istosmjernu struju ne propušta. Zbog zapornog djelovanja zavojnica izmjenični dio je skoro



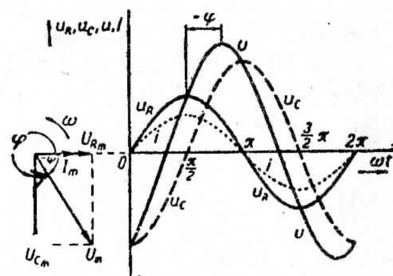
Sl. 27.

posve odijeljen od potrošača. Ovakav postupak, na koji ćemo se kasnije osvrnuti još detaljnije, vrlo je važan na primjer kod prijemnika za otklanjanje brujanja iz mreže.

39. — U dosadašnjim razmatranjima pretpostavljali smo da kondenzator nema nikakvog radnog otpora, da je dakle bez gubitaka. Ako to međutim nije slučaj, možemo ukupni otpor, što ga kondenzator pruža izmjeničnoj struji, smatrati *serijskim spojem radnog otpora R i kapaciteta C* (sl. 28). Sličan slučaj promatrali smo već kod serijskog spoja radnog otpora i induktiviteta (vidi odsjek 20), pa ćemo se s ovim sada kraće zabaviti. Budući da momentana struja i prolazi kroz serijski spoj otpora R i kapaciteta C, ukupni napon u na priključnicama mora u svakom momentu biti jednak sumi napona u_R na radnom otporu i napona u_C na kondenzatoru: $u = u_R + u_C$. Ove djelomične napone i struju i, uzevši u obzir fazne prilike, prikažimo opet krivuljama kao na sl. 29. desno. Prema odsjeku 10. pad napona na otporu u_R u fazi je sa strujom i. Napon u_C zaostaje prema odsjeku 23. za strujom i za četvrtinu periode. G r a f i č k o zbrajanje momentanih vrijednosti u_R i u_C daje krivulju, koja prikazuje tok napona u. Ova krivulja opet je *sinusoida*, ali vremenski leži između obje druge sinusoide. Napon na priključnicama ne zaostaje sada više za četvrtinu periode za strujom i, nego je njegov pomak m a n j i. Prema odsjeku 32. kut pomaka je i sada negativan. Iz ovog dolazimo do pravila: *„Imamo li u krugu izmjenične struje kapacitet s radnim otporom, zaostajat će napon za fazni kut, koji leži između 0° i — 90°, odnosno između 0 i — π/2."*



Sl. 28.



Sl. 29.

40. — Iz v e k t o r s k o g prikaza (sl. 29. lijevo) možemo izvesti i druga pravila. Vektor $U_{R\,m}$, koji pokazuje pad napona na otporu, leži u istom smjeru, kao i vektor struje I_m, jer su ove veličine u fazi. Napon na kondenzatoru $U_{C\,m}$ pomaknut je za —90° prema dolje. Geometriskim zbrajanjem ovih dvaju vektora dobivamo vektor U_m, koji daje ukupni napon na priključnicama. I ovdje se može mjerenjem utvrditi, da duljina zrake U_m odgovara tjemenoj vrijednosti sinusoide za u. Kut pomaka između I_m i U_m leži između 270° i 360°, te je $tg\,\varphi$ negativan.

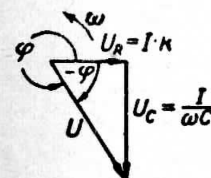
41. — Uzevši u obzir sl. 29. i odsjek 22. nacrtajmo sada trokut za efektivne vrijednosti (sl. 30). Prema Ohmovom zakonu je $U_R = I \cdot R$. Prema istom zakonu je $U_C = I/\omega C$. Iz toga slijedi, da je $tg\,\varphi = -U_C/U_R$ ili:

$$tg\,\varphi = -\frac{1}{\omega C \cdot R} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (25)$$

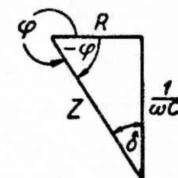
Za R — 0 imat ćemo dakle specijalni slučaj, da je $tg\,\varphi = -\infty$, dakle $\varphi = -90°$ (slučaj čistog kapacitivnog otpora), a za $C = 0$, t. j. za kratko-spojeni kondenzator, $tg\varphi = 0°$, dakle $\varphi = 0°$ (slučaj čistog radnog otpora). Dalje slijedi iz sl. 30.:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (26)$$

N e m o ž e m o dakle ni ovdje uzeti, da je ukupni napon na priključnicama jednak sumi pojedinih napona. *Algebarsko* zbrajanje napona vrijedi samo za *momentane* vrijednosti, ali ne za e f e k t i v n e. Konačno možemo nacrtati (vidi odsjek 23) i t r o k u t otpora, pa imamo sl. 31. Iz ovog trokuta možemo odmah dobiti ukupni otpor Z za izmjeničnu struju, dakle *prividni otpor* ili *impedanciju* serijskog spoja R i C. Iz trokuta



Sl. 30.



Sl. 31.

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (27)$$

otpora slijedi i jednadžba (25.) Ako u Ohmov zakon stavimo izraz za Z kao otpor, dobivamo:

$$U = I \cdot Z = I\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad . \quad . \quad . \quad (28)$$

42. — P r i m j e r: U jednom filterskom spoju imamo kondenzator kapaciteta 0,1 μF spojen u seriju s radnim otporom od 20 kΩ. Kolika je impedancija i fazni kut za tonsku frekvenciju 100 Hz? R j e š e n j e: Za-

dano je $C = 0{,}1\ \mu F = 10^{-7}\ F$, $R = 2 \cdot 10^4\ \Omega$, $\omega = 200\ \pi$, a traži se Z i φ. Iz jednadžbe (27) imamo: $Z = \sqrt{4 \cdot 10^8 + \left(\frac{1}{200\pi \cdot 10^{-7}}\right)^2} = \sqrt{4 \cdot 10^8 + (10^5/2\pi)^2} = \sqrt{4 \cdot 10^8 + 10^{10}/4\pi^2} = \sqrt{(4 + 2{,}5) \cdot 10^8} = 2{,}55 \cdot 10^4\ \Omega = 25{,}5\ k\Omega$. Dalje iz jednadžbe (25) slijedi: $tg\varphi = -1/200\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^4 = -1/0{,}4\pi = -0{,}7958$; $\varphi = -38^0\ 31'$.

Ponavljanje

Iz smjese istosmjerne i izmjenične struje dade se induktivitetom i kapacitetom izlučiti istosmjerna, odnosno izmjenična komponenta (filtersko djelovanje). Struja, koja teče kroz serijski spoj otpora i kapaciteta, prethodi naponu na priključnicama za manje od četvrtinu periode. Fazni kut se izračunava jednadžbom: $tg\ \varphi = -1/\omega C \cdot R$. Napon na priključnicama zaostaje za strujom, dakle fazni kut je negativan. Efektivna, odnosno tjemena vrijednost napona na priključnicama može se pomoću trokuta izračunati iz radnog i praznog pada napona, pa imamo: $U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$ (*geometrijsko zbrajanje* napona). Na isti način iz trokuta otpora dobivamo *prividni otpor (impedanciju)* serijskog spoja R i C, naime: $Z = \sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}$. Po Ohmovom zakonu je onda: $U = I \cdot Z$.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Čemu služe filterski spojevi? *Odgovor:* Za odjeljivanje istosmjerne struje od izmjenične iz smjese, u kojoj postoje obje vrste struja. — *P.:* Koji elementi djeluju kod ovog odjeljivanja? *O.:* Induktivitet i kapacitet. Istosmjernu komponentu propušta induktivitet, dok izmjeničnu komponentu propušta kapacitet. — *P.:* Kakvi su fazni odnosi kod serijskog spoja radnog otpora i kapaciteta? *O.:* Napon na priključnicama zaostaje za strujom za manje od četvrtinu periode. — *P.:* Kako se može izračunati fazni kut? *O.:* $tg\varphi = -1/\omega C \cdot R$. — *P.:* Kako se sastavlja ukupni napon iz padova napona na radnom otporu i kapacitetu? *O.:* *Momentana* vrijednost napona na priključnicama jednaka je *sumi momentanih* vrijednosti padova napona; *efektivna* vrijednost jednaka je *geometriskoj* sumi. — *P.:* Koliki je prividni otpor serijskog spoja radnog otpora i kapaciteta? *O.:* $Z = \sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}$. — *P.:* Kako se ova jednadžba može lako izvesti? *O.:* Iz trokuta otpora.

Gubici u kondenzatoru

43. — Poznavanje i smanjivanje gubitaka u kondenzatoru u radiotehnici je pitanje od posebnog značenja. Iako je kod modernih izolatora električka vodljivost za istosmjernu struju praktički zanemarivo malena, kod prolaza izmjenične struje mogu nastati znatni gubici učina. Gubici uslijed omskog otpora uvjetovani su radnim otporom metalnih dijelova kondenzatora (od priključnica, pa do najudaljenije točke ploče kondenzatora). Za izmjeničnu struju kod ovih metalnih dijelova mjerodavan je naprotiv skin-efekt. Radni otpor uvjetovan ovim efektom proporcionalan je d r u g o m k o r i j e n u frekvencije izmjenične struje. Ovaj otpor se može smanjiti posrebrivanjem metalnih dijelova. Gubici uslijed *isijavanja* nisu općenito tako veliki i dolaze do izražaja tek kod vrlo visokih frekvencija (kratki i ultrakratki valovi). Potrebno je međutim voditi računa o činjenici, da su ovi gubici proporcionalni kvadratu frekvencije i razmaku

ploča. Oni nastaju uslijed toga, što se linije električkog polja ne nalaze samo između ploča kondenzatora, nego izlaze i izvan ploča. Radi toga dolazi do „rasipanja". Najznatniji su ipak *dielektrički* gubici u dielektrikumu kondenzatora. Do njih dolazi radi trenja, koje se pojavljuje kod titranja elektrona oko njihovog položaja mirovanja (vidi odsjek 30). Što elektroni brže titraju, što je dakle viša frekvencija izmjenične struje, to se jače osjećaju posljedice ovog trenja. Svi spomenuti gubici djeluju zajednički kao otpor spojen u seriju s kondenzatorom (vidi odsjek 39 i sl. 28). Kod visokih frekvencija gubici izazvani izmjeničnom strujom mogu biti preko milion puta veći od onih istosmjerne struje.

44. — Kao i kod zavojnica (vidi odsjek 25), tako je i kod kondenzatora kut gubitaka mjerilo za veličinu gubitaka kod prolaza izmjenične struje. Iz sl. 31 imamo: $\delta = (90^0 - [-\varphi]) = 90^0 + \varphi$, a $tg\ \delta = R/(1/\omega C)$, dakle:

$$tg\ \delta = \omega C \cdot R \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (29)$$

Kut gubitaka je dakle proporcionalan kružnoj frekvenciji ω, kapacitetu i radnom otporu. Ako dva izolatora imaju isti kut gubitaka, onda je bolji onaj, koji ima manju dielektričku konstantu ε (dielektrička konstanta je broj koji kaže, koliko puta će se povećati kapacitet kondenzatora, ako mu umjesto zraka stavimo među ploče dotični izolator), jer će prema jednadžbi (29) C, a prema tome i $tg\ \delta$, biti to manji, što je manja dielektrička konstanta. No, kako kod kondenzatora moramo postići stanoviti kapacitet, u ovom će slučaju biti povoljnije uzeti izolator sa što većom dielektričkom konstantom i što manjim kutom gubitaka. Za kvarc je na primjer $tg\ \delta$ kod 1000 kHz (1 MHz) jednak $0{,}0001 = 10^{-4}$, odnosno $\delta = 0{,}343'$. Budući da i ostali visokovrijedni izolatori imaju kut gubitaka veličine istog reda, daje se kut gubitaka u 10^{-4} kao jedinici. Za kvarc je prema tome $tg\ \delta = 1{,}0 \cdot 10^{-4}$, odnosno $tg\ \delta \cdot 10^4 = 1{,}0$.

45. — Priložena tabela daje izmjerene vrijednosti za $tg\,\delta \cdot 10^4$ i za ε, i to za važnije izolatore kod frekvencije 1 MHz. Vidimo da danas već ima izolatora, koji imaju kut gubitaka manji, nego što ga ima do sada najbolji izolator kvarc. Vidimo da naročito velike vrijednosti dielektričke konstante imaju Condensa C, Kerafar T i Kerafar U. Kod ovih posljednjih je kut gubitaka nešto veći, ali još uvijek razmjerno malen. Iz iste tabele možemo dalje vidjeti, kako su loši kutovi gubitaka kod materijala, koji su se nekad mnogo upotrebljavali (porculan,

Izolator	$tg\,\delta \cdot 10^4$ kod 1 MHz	ε
Tempa S . . .	0,8	14
Diacond . . .	1,0	16
Kvarc	1,0	3,8 do 4,7
Ultra-Calan . .	1,0 do 1,8	7,1
Trolitul	1,4	2,1 do 2,5
Tinjac	1,7	7,0
Kerafar T i U .	2,0	45 i 60
Calan	3,2	6,6
Calit	3,8	6,5
Staklo	5,3	6 do 8
Condensa C . .	5,6	80
Frekventa . .	7	5,5 do 6,5
Porculan . . .	55	5,4 do 6
Tvrda guma . .	65	2 do 3
Papir	145	1,2 do 1,3
Bakelit S . . .	160	5 do 8
Tlačeni jantar .	170	2,9
Pertinaks . . .	220	5,4

tvrda guma, bakelit, pertinaks i t.d.). Osim toga je zanimljivo da se kutovi gubitaka kod većine modernih keramičkih izolatora smanjuju porastom frekvencije, što kod starih izolatora nije slučaj (vidi jednadžbu 29). Konačno napominjemo, da se kod izolatora Calit, Calan, Ultra-Calan, Kerafar, Frekventa, Diacond, Tempa i Condensa radi o k e r a m i č k i m izolatorima, koji se uglavnom sastoje od magnezijevog silikata. Trolitul je, naprotiv, masa od umjetne smole, dok se bakelit proizvodi od fenola i formaldehida, a pertinaks od tlačenog papira natopljenog u bakelitni lak.

Ponavljanje

Gubici radi omskog otpora, radi isijavanja i dielektrički gubici su u kondenzatoru gubici uslijed izmjenične struje, kojih kod istosmjerne struje nemamo. Ovi gubici dolaze do izražaja naročito kod visokih frekvencija. Najveći dio otpada pri tome na dielektričke gubitke izazvane trenjem, koje nastaje uslijed titranja elektrona u dielektrikumu. Vrijednost izolatora obzirom na gubitke mjeri se kutom gubitaka, odnosno tangensom toga kuta: $tg\,\delta = \omega C \cdot R$. Kod dobrih izolatora $tg\,\delta$ je veličina reda 10^{-4}.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Od kakvih se gubitaka sastoje ukupni gubici kod izmjenične struje, kad se radi o kondenzatoru? *Odgovor:* U prvom redu od gubitaka u dielektrikumu, zatim od gubitaka uslijed isijavanja i omskog otpora. — *P.*: Čime su uzrokovani dielektrički gubici? *O.*: Trenjem kod dielektričkog pomaka elektrona u dielektrikumu kondenzatora. — *P.*: Kako se brojčano izražavaju gubici u kondenzatoru? *O.*: Kutom gubitaka ili tangensom toga kuta. — *P.*: Kako se može izračunati tangens kuta gubitaka? *O.*: Iz jednadžbe: $tg\,\delta = \omega C \cdot R$ (C u [F], R u [Ω]). — *P.*: U veličini kojeg reda leži $tg\,\delta$ kod modernih izolatora? *O.*: U veličini reda 10^{-4}.

Pitanja

16. Ukoliko se razlikuju fazne prilike kod kapaciteta od onih kod induktiviteta?
17. Zašto je fazni kut kod kapaciteta negativan?
18. Nabrojte nekoliko naročito dobrih izolatora (obzirom na kut gubitaka)!

Zadaci

13. Žarulja s radnim otporom 800 Ω spojena je u seriju s kondenzatorom od 2 μF. Ovaj serijski spoj priključen je na rasvjetnu mrežu napona 220 V i 50 Hz. a) Kolika je impedancija ovog serijskog spoja; b) kolika je efektivna jakost struje; c) koliki su padovi napona na kondenzatoru i na žarulji; d) koliki je fazni kut?

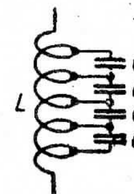
14. Na serijskom spoju radnog otpora i kapaciteta imamo napon od 25 V. Koliki je napon na kapacitetu, ako smo na radnom otporu izmjerili pad napona od 12 V?

15. Kod koje frekvencije ima serijski spoj kapaciteta 10 000 pF i radnog otpora 2 kΩ impedanciju 4 kΩ?

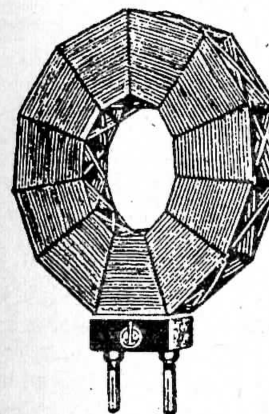
Praktičke izvedbe i proračunavanje zavojnica

46. — U dosadašnjim razmatranjima bavili smo se fizikalnim svojstvima induktiviteta i kapaciteta u krugu izmjenične i istosmjerne struje. Sada pak želimo upoznati, kako se ovi elementi, koji su za radiotehniku

tako važni, dadu p r a k t i č k i izvesti, proračunati i spajati. Kao što već znamo iz odsjeka 25. dobra zavojnica mora imati što manji radni otpor. Gubici energije bit će to manji, što je manji skin-efekt, što je stvaranje vrtložnih struja manje, što su manji gubici u izolaciji i gubici uslijed isijavanja, a kod zavojnica sa željeznom jezgrom, što je manji učin, koji se troši na premagnetiziranje. U ovom pogledu cilindrične zavojnice, koje su nam već dobro poznate, imaju vrlo povoljna svojstva. Budući da kod njih zavoji leže gusto jedan uz drugi, svaki od njih tvori sa susjednim zavojem kondenzator malenog kapaciteta C (sl. 32). Radi toga govorimo o *vlastitom* kapacitetu zavojnice. Vlastiti kapacitet predstavlja za zavojnicu paralelni ogranak i povećava na taj način gubitke zavojnice. K tome dolaze još dielektrički gubici u nosaču zavojnice i u izolaciji žice, koji djeluju kao dielektrikum. Ove gubitke možemo izbjeći tako, da upotrebljavamo što manje čak i vrlo dobrih izolatora (vidi odsjek 45). Često se zavojnice izvode bez nosača ili se namataju na cijevi sa zvjezdasto poredanim rebrima.



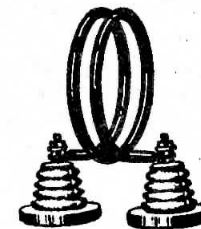
Sl. 32


Sl. 33.

47. — Vlastiti kapacitet dade se smanjiti i naročitim načinima namatanja. Pri tome pojedini zavoji ne leže više jedan uz drugi ili jedan na drugome, nego se križaju i dodiruju samo u pojedinim točkama, tako da zavojnica ima mrežasti oblik (sl. 33). No ove se zavojnice danas vrlo rijetko upotrebljavaju. Drugi način namatanja je plosnato namatanje, kakvo dolazi u obzir naročito kod zavojnica s velikim brojem zavoja. Tu je čitav namotaj podijeljen u više tankih ploča (sl. 34), pa je vlastiti kapacitet relativno malen. Kako spomenuti gubici kod visokih i vrlo visokih frekvencija djeluju štetno, to se zavojnice za kratke i ultrakratke valove izrađuju redovito bez nosača i od debele posrebrene bakrene žice ili cijevi (sl. 35). Danas se međutim izrađuju dobre zavojnice za kratke valove čak i sa željeznom jezgrom (vidi odsjek 48).

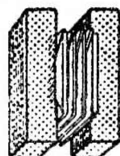

Sl. 34.

48. — Moderne zavojnice imaju gotovo redovito jezgru od posebnog v i s o k o f r e k v e n t n o g ž e l j e z a. Radi većeg permeabiliteta kod željezne jezgre (permeabilitet je broj, koji kaže, za koliko će se induktivitet zavojnice povećati, ako se u zavojnicu stavi jezgra od dotičnog materijala), znatno se povećava induktivitet zavojnice. Da se postigne stanoviti induktivitet potreban je dakle manji broj zavoja i žica manje duljine, pa su i gubici manji. Ovakve zavojnice odlikuju se osim toga vrlo malenim dimenzijama, što je za gradnju prijemnika od posebnog značenja. Permeabilitet jezgre od visokofrekventnog željeza nije ni izdaleka tako velik, kao permeabilitet transformatorskog željeza.

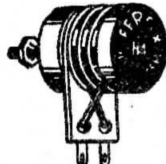

Sl. 35.

Budući da se zbog vrlo velikih gubitaka od vrtložnih struja za ovakve zavojnice ne može upotrebiti obični željezni lim, bilo je potrebno izvesti mnoge pokuse dok se je došlo do „visokofrekventnog željeza" Željezo se naime za ove svrhe mora usitniti, a pojedina zrnca (promjera oko 0,002 mm) potrebno je međusobno dobro izolirati, da bi se u što većoj mjeri izbjegle vrtložne struje. Danas raspolažemo različitim vrstama ovakvog željeza, kao na pr.: Ferrocart, Sirufer, Draloperm i t. d. Jezgre se prave bilo tako, da se tlače listići papira, na koje je nanesen tanak sloj željezne prašine, bilo da se željezna prašina sama tlači u čeličnim kalupima pod vrlo visokim tlakom. U svakom slučaju željeznoj prašini se dodaje sredstvo za lijepljenje. Sl. 36. prikazuje na primjer jednu Sirufer-jezgru u obliku slova H s praznim nosačem za namotaj. Na sl. 37. vidimo prigušnicu sa željeznom jezgrom i namotajem, koji je podijeljen na tri dijela.

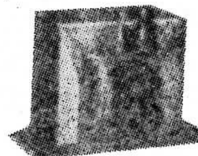
49. — Na sl. 38. imamo konačno jednu niskofrekventnu prigušnicu, kakva se upotrebljava na primjer kod filtera u ispravljačima prijemnika ili pojačala.



Sl. 36.



Sl. 37.



Sl. 38.

Namotaj, kojeg krajeve vidimo na slici na priključnicama, smješten je na srednjem stupu željezne jezgre, koja ima oblik slova E. Jezgra je sastavljena od limova, da bi se umanjili gubici uslijed vrtložnih struja. Limovi su međusobno izolirani papirom, lakom ili oksidnim slojem. Čitav paket željeza, to jest jezgra u obliku slova E i jaram, koji je zatvara, stegnut je oklopom od aluminija.

Ponavljanje

Dielektrički gubici u izolatorima i kapacitet između pojedinih zavoja (vlastiti kapacitet) povećavaju gubitke u zavojnici. Ovi gubici mogu se smanjiti posebnim načinima namatanja i upotrebom dobrih izolatora. Za vrlo visoke frekvencije zavojnice se najčešće izrađuju od debele bakrene žice ili cijevi. Ako zavojnica ima jezgru od *visokofrekventnog željeza,* tada je stanoviti induktivitet moguće postići s mnogo manje zavoja, nego bez jezgre. Smanjivanjem broja zavoja smanjuju se i gubici, a i dimenzije zavojnice. *Niskofrekventne* prigušnice imaju zatvorenu željeznu jezgru načinjenu od željeznih limova, koji su međusobno izolirani.

Pitanja i odgovori

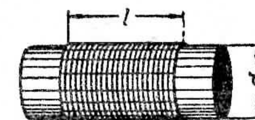
Pitanje: Kako se može načiniti zavojnica s malenim vlastitim kapacitetom? *Odgovor:* Naročitim načinom namatanja, kod kojeg se pojedine izolirane žice namotaja dotiču na vrlo malo mjesta, zatim pločastim namotajem i namotajem s velikim razmakom među zavojima (zavojnice bez nosača). — *P.*: Kako se mogu umanjiti dielektrički gubici zavojnica? *O.*: Upotrebom što boljih izolatora za nosač i za izolaciju žice. — *P.*: Kakve naročite prednosti ima zavojnica s visokofrekventnom željeznom jezgrom? *O.*: Zbog većeg permeabiliteta manji je broj zavoja, a time se umanjuju dimenzije zavojnice i vlastiti kapacitet. — *P.*: Od čega se sastoji visokofrekventna željezna jezgra? *O.*: Od vrlo fine željezne prašine, čije čestice su međusobno izolirane. — *P.*: Zašto se za te svrhe ne može upotrebiti obični željezni lim? *O.*: Zato, što bismo u njemu kod visokih frekvencija imali vrlo velike gubitke. — *P.*: Od čega se uglavnom sastoje gubici u željezu? *O.*: Od gubitaka uslijed vrtložnih struja i gubitaka, koji nastaju radi premagnetiziranja.

50. — Induktivitet zavojnice možemo izračunati prema jednadžbi (15). Ova jednadžba vrijedi međutim samo za posve homogeno magnetsko polje, kakvo na primjer imamo u unutrašnjosti vrlo dugačke jednoslojne cilindrične zavojnice ili u unutrašnjosti prstenaste zavojnice. Što je cilindrična zavojnica kraća, to je magnetsko polje nehomogenije, pa jednadžba (15) ne daje točne vrijednosti. Kod ostalih vrsta zavojnica prilike su još nepovoljnije, jer kod njih magnetsko polje ne možemo smatrati ni približno homogenim. Stoga se za različite vrste zavojnica daju naročite jednadžbe, koje se uglavnom temelje na praktičkom iskustvu, a dovoljno su točne za tehničke potrebe.

51. — Za jednoslojne cilindrične zavojnice (sl. 39) vrijedi približno jednadžba:

$$\boxed{L = a \frac{w^2 \cdot d^2}{l} \cdot 10^{-9} \quad [H]} \qquad . \quad . \quad (30)$$

Ovdje je w broj zavoja, d promjer zavojnice u centimetrima, l duljina namotanog sloja u centimetrima, dok a predstavlja faktor (faktor oblika) ovisan o odnosu d/l. Ovaj faktor je predočen krivuljom na sl. 40. Za vrlo dugačke zavojnice, to jest za vrlo malene vrijednosti d/l, poklapa se jednadžba (30) prilično dobro s teoretskom jednadžbom (15). Za jednoslojne prstenaste zavojnice (sl. 41) je $l = 2\pi r$.



Sl. 39.

Zbog $\mu = 1$ i $\Pi \doteq 0{,}4\,\pi$ imamo iz jednadžbe (15): $L = 0{,}4\,\pi \frac{w^2 \cdot F}{2\pi \cdot r} 10^{-8}$ ili:

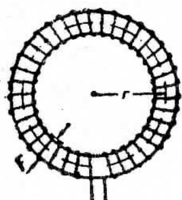
$$\boxed{L = \frac{2w^2 \cdot F}{r} \cdot 10^{-9} \, [H]} \qquad . \quad . \quad . \quad (31)$$

Ovdje je F presjek zavojnice u kvadratnim centimetrima, a r srednji polumjer prstena u cm.

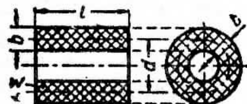
52. — Primjer: Jednoslojna cilindrična zavojnica ima promjer 40 mm, duljinu 50 mm i 50 zavoja. Koliki je induktivitet ove zavojnice? Rješenje: Znamo da je $d = 40$ mm $= 4$ cm, $l = 50$ mm $= 5$ cm, $w = 50$, a traži se L. Budući da je $d/l = 0{,}8$, iz sl. 40 imamo $a = 7{,}3$. Prema jednadžbi (30) je onda:

$$L = 7{,}3 \frac{2500 \cdot 16}{5} \cdot 10^{-9} = 58{,}4 \cdot 10^{-6} \text{ H} = 58{,}4 \, \mu\text{H} = 58400 \text{ cm}.$$

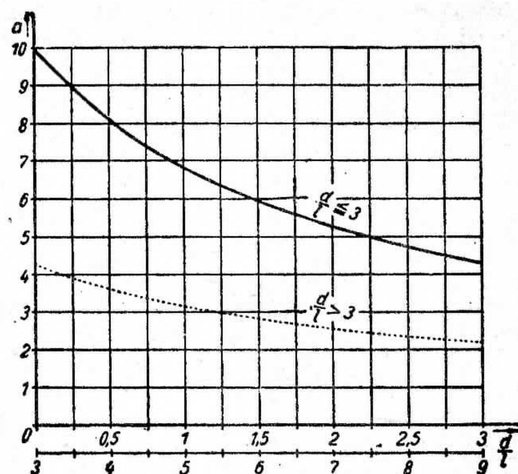
53. — Izračunavanje induktiviteta može se, uostalom, za gotovo sve vrste zavojnica, koje u praksi dolaze u obzir, iz-



Sl. 41.



Sl. 42.



Sl. 40.

vršiti i pomoću Korndörferove jednadžbe, koja glasi:

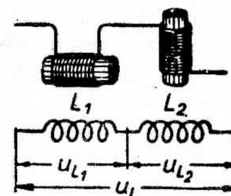
$$L = 10{,}5 \cdot w^2 \cdot d \cdot k \cdot 10^{-9} \text{ [H]} \quad . \quad . \quad (32)$$

Ovdje w znači broj zavoja, d srednji promjer zavojnice u cm, a k faktor ovisan o omjeru d/U, kada je $U = 2\,(l + b)$ opseg pravokutnog presjeka namotaja u cm, l duljina namotaja u cm, a b debljina namotanog sloja u cm (sl. 42).

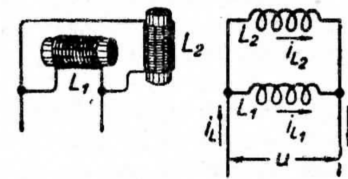
Za vrijednosti d/U između 0 i 1 imamo $k = \sqrt[4]{d/U}$, za d/U između 1 i 3 $k = \sqrt{d/U}$, a za $d = U$, $k = 1$. Za d/U veće od 3 jednadžba (32) ne vrijedi. Za zavojnice kod kojih je b/l jednako ili veće od 7 (plosnate zavojnice) i d/U između 0 i 3 imamo $k = \sqrt{d/U}$.

54. — Primjer: Višeslojna zavojnica bez jezgre ima duljinu i širinu namotaja po 20 mm, srednji promjer 60 mm i 200 zavoja. Koliki je njezin induktivitet? Rješenje: Zadano je $l = 20$ mm $= 2$ cm, $b = 20$ mm $= 2$ cm, $U = 2 \cdot 4 = 8$ cm, $d = 60$ mm $= 6$ cm, $w = 200$; traži se L. Budući da je $d/U = 0{,}75$, dakle između 0 i 1, to je $k = \sqrt[4]{d/U} = \sqrt[4]{0{,}75} = 0{,}931$. Iz jednadžbe (32) imamo: $L = 10{,}5 \cdot 4 \cdot 10^4 \cdot 6 \cdot 0{,}931 \cdot 10^{-9} = 2{,}3 \cdot 10^{-3}$ H $= 2{,}3$ mH.

55. — Spojimo li dvije zavojnice, koje imaju induktivitet L_1 i L_2, u seriju (sl. 43), pa ih priključimo na izmjenični napon, protjecat će kroz njih jednaka struja. Računamo li s momentanim vrijednostima, ukupni napon na priključnicama mora biti jednak sumi padova napona na pojedinoj zavojnici, dakle: $u_L = u_{L_1} + u_{L_2}$. Prema Ohmovom zakonu $i \cdot \omega L = i \cdot \omega L_1 + i \cdot \omega L_2$, dakle $L = L_1 + L_2$. Ovdje L znači ukupni induktivitet serijskog spoja. Riječima bi se to moglo reći ovako: *„Ako se zavojnice spajaju u seriju, tada je ukupni induktivitet jednak sumi pojedinih induktiviteta."* Zaključak je međutim samo onda valjan, ako magnetska polja pojedinih zavojnica ne djeluju jedno na



Sl. 43.



Sl. 44.

drugo, ako dakle zavojnice nisu međusobno *„induktivno vezane"*. Zbog toga su zavojnice postavljene međusobno okomito (sl. 43).

56. — Za paralelni spoj dviju zavojnica (sl. 44), između kojih ne postoji induktivna veza, vrijedi prema prvom Kirchhoffovom zakonu $i_L = i_{L_1} + i_{L_2}$, ako ovdje i_{L_1} i i_{L_2} znači momentanu vrijednost struja, koje teku kroz zavojnicu L_1, odnosno L_2, dok je i_L momentana vrijednost ukupne struje. Kako obje zavojnice leže na istom naponu u, bit će prema Ohmovom zakonu: $u/\omega L = u/\omega L_1 + u/\omega L_2$ ili $1/L = 1/L_1 + 1/L_2$. Riječima: *„Spajaju li se dvije zavojnice paralelno, tada je recipročna vrijednost ukupnog induktiviteta jednaka sumi recipročnih vrijednosti pojedinih induktiviteta."* Za $L_1 = L_2 = L'$ imamo $1/L = 2/L'$ ili $L = L'/2$. Ovdje su prilike dakle posve iste kao da se radi o spajanju omskih otpora.

Ponavljanje

Izračunavanje *induktiviteta L* zavojnica, kod kojih magnetsko polje nije dovoljno homogeno, samo je približno točno i vrši se jednadžbama, do kojih se došlo praktički. *Korndörferova* jednadžba daje dovoljno točne rezultate za sve vrste zavojnica. Kod *serijskog* spajanja zavojnica ukupni induktivitet jednak je sumi pojedinih induktiviteta, dok je kod *paralelnog* spajanja recipročna vrijednost ukupnog induktiviteta jednaka sumi recipročnih vrijednosti pojedinih induktiviteta. Ovo vrijedi uz pretpostavku, da zavojnice nisu međusobno magnetski vezane.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Može li se induktivitet zavojnice teoretski točno izračunati? *Odgovor:* Može, ali samo u slučaju da je njezino magnetsko polje homogeno, kako je to na primjer kod dugačkih cilindričnih i prstenastih zavojnica. — *P.*: Kako se izračunava induktivitet kod ostalih zavojnica? *O.*: Približnim jednadžbama, do kojih se došlo praktički, kao što je na primjer Korndörferova jednadžba. — *P.*: Koliki je induktivitet serijskog, odnosno paralelnog spoja zavojnica? *O.*: U slučaju da među zavojnicama nema magnetske veze, ukupni induktivitet kod serijskog spoja jednak je sumi pojedinih induktiviteta, a kod paralelnog spoja recipročna vrijednost ukupnog induktiviteta jednaka je sumi recipročnih vrijednosti pojedinih induktiviteta.

Pitanja

19. Kakve izvore gubitaka imamo kod zavojnica?
20. Kakva je razlika između običnih i visokofrekventnih željeznih jezgri?
21. Kakva je praktička vrijednost Korndörferove jednadžbe?

Zadaci

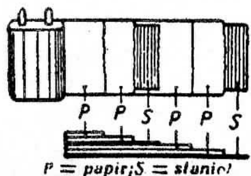
16. Koliki presjek mora imati prstenasta zavojnica, koja ima 300 zavoja i polumjer prstena 20 mm, ako joj induktivitet mora biti 0,1 mH?

17. Višeslojna zavojnica ima opseg pravokutnog namotaja 60 mm i srednji promjer 40 mm. S koliko zavoja se ona mora namotati, ako joj induktivitet mora iznositi 200 µH?

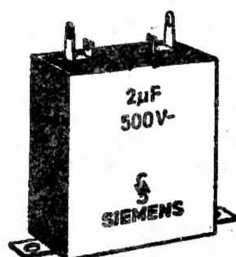
18. Dvije zavojnice s induktivitetom 20 mH i 0,01 H spajaju se: a) paralelno, b) u seriju. Koliki je u oba slučaja ukupni induktivitet, ako među zavojnicama ne postoji magnetska veza?

Praktičke izvedbe i proračunavanje kondenzatora

57. — Kondenzatori se u radiotehnici, zbog svog svojstva da propuštaju izmjeničnu, a zadržavaju istosmjernu struju, vrlo često upotrebljavaju. U biti se razlikuju dvije vrste kondenzatora: *promjenljivi* i *nepromjenljivi* ili *čvrsti.* Čvrsti kondenzatori grade se najčešće od staniolnog, aluminijskog ili bakrenog lima, a kao izolator služi — već prema tome kako maleni gubici se žele — papir nauljen ili namočen u parafin, tinjac, keramički izolatori ili zrak. Da se uz što manji volumen postigne što veći kapacitet, za obloge kondenzatora uzimaju se dugačke metalne trake, među kojima se kao dielektrikum nalazi tanki izolator (sl. 45). Ovako složene trake se smotaju i zatvore u kutiju od metala ili izolatora, da se kondenzator zaštiti od vlage. Jedan takav kondenzator vidimo na sl. 46. Probojna čvrstoća kondenzatora ovisna je o debljini i vrsti dielektrikuma i može iznositi više tisuća volta. Zbog sigurnosti *pogonski* napon mora biti bar tri puta manji od *ispitnoga.*

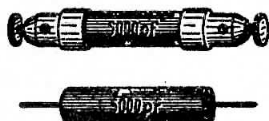


Sl. 45.



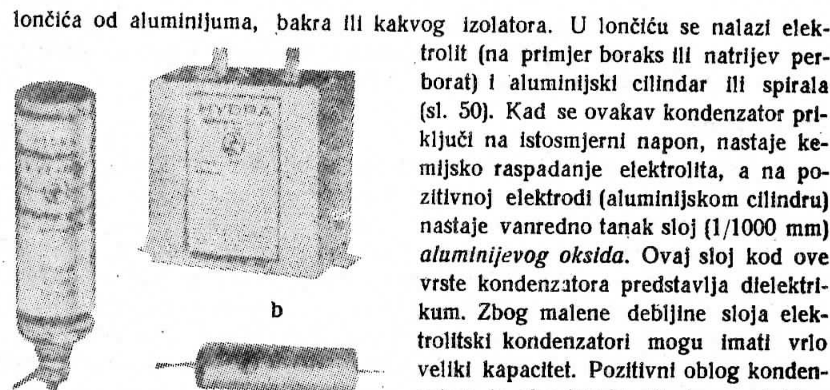
Sl. 46.

58. — Manji kondenzatori izvode se redovito kao valjkasti kondenzatori (sl. 47) s tinjcem kao dielektrikumom. Kondenzatori s naročito malenim gubicima građeni su od tinjca, na koji je direktno naneseno srebro. Postoje međutim i druge izvedbe kod kojih su srebrni oblozi naneseni direktno s obje strane keramičkih izolatora posrebrivanjem u vatri (kondenzatori u obliku pločica, cjevčica i kapica). Za vrlo visoke frekvencije (kratki val!) upotrebljavaju se najčešće čvrsti kondenzatori s *zrakom* kao dielektrikumom, pa su njihovi gubici vrlo maleni (sl. 48).

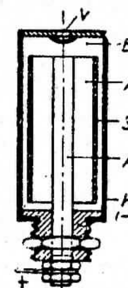

Sl. 47.


Sl. 48.

59. — Kad su potrebni vrlo veliki kapaciteti, često se upotrebljavaju e l e k t r o l i t s k i   k o n d e n z a t o r i. Oni uprkos velikom kapacitetu imaju napadno malen volumen (sl. 49). Građeni su redovito u obliku lončića od aluminijuma, bakra ili kakvog izolatora. U lončiću se nalazi elektrolit (na primjer boraks ili natrijev perborat) i aluminijski cilindar ili spirala (sl. 50). Kad se ovakav kondenzator priključi na istosmjerni napon, nastaje kemijsko raspadanje elektrolita, a na pozitivnoj elektrodi (aluminijskom cilindru) nastaje vanredno tanak sloj (1/1000 mm) *aluminijevog oksida.* Ovaj sloj kod ove vrste kondenzatora predstavlja dielektrikum. Zbog malene debljine sloja elektrolitski kondenzatori mogu imati vrlo veliki kapacitet. Pozitivni oblog kondenzatora je aluminijski cilindar, a elektrolit, odnosno metalni lončić je negativni oblog. Važno je napomenuti, da kod elektrolitskih kondenzatora postoji *polaritet.* Ako se slučajno plus-pol kondenzatora spoji s minus-polom izvora struje, dolazi do elektrolitskog rastvaranja oksidnog sloja, te kondenzator propušta struju! Iz toga slijedi da se elektrolitski kondenzatori mogu upotrebljavati samo za *istosmjerni* napon ili za pulzirajući napon, kod kojeg je superponirani izmjenični napon malen. Ako je napon na kondenzatoru previsok, dolazi do proboja oksidnog sloja, pa kondenzator opet djelomično propušta istosmjernu struju. Pri tome međutim ne dolazi do uništenja kondenzatora. Čim napon naime postane manji, „regenerira" se oksidni sloj sam od sebe. Trajno preopterećivanje ne smije se ipak dopustiti, jer pri tome dolazi do jakog razvijanja plinova, pa kondenzator može eksplodirati. Da se ova opasnost smanji, na vrhu lončića nalazi se sigurnosni ventil. Zbog spomenutih svojstava kod ovakvih se kondenzatora ne navodi ispitni, nego pogonski istosmjerni napon. Jedan primjer kondenzatora izvedenog prema sl. 50 vidimo na sl. 49-a (kapacitet 8 µF, pogonski napon 400 V, promjer 35 mm, visina 75 mm).



Sl. 49.



Sl. 50.

60. — Osim ovakvih elektrolitskih kondenzatora s tekućim elektrolitom postoje i *„suhi"* elektrolitski kondenzatori. Ovi za razliku od prvih nemaju slobodan tekući elektrolit, nego papirnate ili platnene trake namočene u elektrolit i stavljene među trake aluminija. Kućište ovakvih kondenzatora može biti od metala (sl. 49-b) ili papira (sl. 49-c). Kondenzator na sl. 49-b ima kapacitet 2000 µF uz pogonski napon 50 V, a dimenzije su mu 25×90×120 mm, dok onaj na sl. 49-c ima kapacitet 25 µF, pogonski napon 15 V, a dimenzije 18×55 mm. Elektrolitski kondenzatori mogu se, već prema pogonskom naponu (do 550 V), izvoditi s kapacitetom od više tisuća mikrofarada. Za razliku od kondenzatora s čvrstim dielektrikumom, elektrolitski kondenzatori imaju trajnu i dosta veliku s t r u j u   g u b i t a k a. Ona doduše kratko vrijeme nakon ukapčanja padne, ali još uvijek iznosi dio miliampera po mikrofaradu. Za slučajeve, kad postoji opasnost od krivog ukapčanja, mogu se upo-

trebiti i posebne izvedbe elektrolitskih kondenzatora, kod kojih polaritet nije važan, ali se i ovi smiju upotrebljavati samo za *istosmjerni* napon. O praktičkoj upotrebi elektrolitskih kondenzatora bit će više govora kasnije.

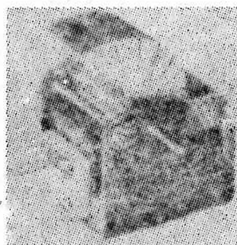
Ponavljanje

Čvrsti kondenzatori izvode se najčešće tako, da se uzmu dvije dugačke metalne trake, koje se papirom, tinjcem ili sličnim izolatorom međusobno odijele, a da bi se dobio što manji volumen, smotaju se u obliku valjka. Za kondenzatore s naročito malenim gubicima uzima se kao dielektrikum tinjac ili keramički izolatori, na koje se oblog nanosi direktno posrebrivanjem. Često se upotrebljavaju i kondenzatori sa *zrakom* kao dielektrikumom. Za veće kapacitete uzimaju se *elektrolitski* kondenzatori, koji, iako velikog kapaciteta, zauzimaju vrlo malo mjesta. Kod njih se dielektrikum sastoji od tankog sloja aluminijevog oksida. Ovi kondenzatori imaju polaritet, pa je kod priključivanja potrebno paziti da se ne priključe krivo. Svi elektrolitski kondenzatori, pa i oni posebne izvedbe, kod kojih polaritet nije važan, smiju se priključiti samo na istosmjerni napon. Kod većih napona ne dolazi kod elektrolitskih kondenzatora do proboja, kao kod ostalih kondenzatora. Oni, doduše, tada propuštaju struju, ali se, kad se napon snizi, regeneriraju. Trajno preopterećenje ipak se ne smije dopustiti.

Pitanja i odgovori

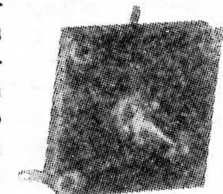
Pitanje: Kako su građeni obični čvrsti kondenzatori? *Odgovor:* Od dvije metalne trake međusobno izolirane i smotane u obliku valjka. — *P.*: Kakvi su kondenzatori, koji imaju naročito malene gubitke? *O.*: To su kondenzatori, kod kojih su oblozi direktno naneseni na dielektrikum, koji ima malene gubitke. Zračni kondenzatori su također kondenzatori s vrlo malenim gubicima. — *P.*: Koliki smije biti pogonski napon čvrstih kondenzatora? *O.*: On smije iznositi jednu trećinu ispitnog napona. — *P.*: Kakve prednosti imaju elektrolitski kondenzatori? *O.*: Oni uz malene dimenzije mogu imati vrlo veliki kapacitet i ne uništavaju se kratkotrajnim preopterećenjem. — *P.*: Čime se postizava tako veliki kapacitet? *O.*: Upotrebom vrlo tankog oksidnog sloja kao dielektrikuma. — *P.*: Zašto se elektrolitski kondenzatori smiju upotrebljavati samo za istosmjerni napon? *O.*: Zato što kod izmjeničnog napona dolazi do razaranja oksidnog sloja.

61. — Ako se kondenzator izvede tako da je jedna grupa ploča p o m i č n a prema drugoj, dobivamo kondenzator s p r o m j e n l j i v i m kapacitetom, dakle *promjenljivi* kondenzator. Na sl. 51 vidimo takav kondenzator s kapacitetom 550 pF. Što se više pomična grupa ploča (rotor) izvuče iz nepomične (stator), to je kapacitet kondenzatora manji. Kondenzatori s promjenljivim kapacitetom imaju u radiotehnici vrlo važnu ulogu, jer se pomoću njih titrajni krugovi ugađaju na željenu frekvenciju. Kako je i kod promjenljivih kondenzatora vrlo važno, da imaju što manje gubitke, uzima se kao dielektrikum najčešće zrak. Da bi gubici bili maleni, i svi ostali nemetalni dijelovi moraju biti od izolatora s malenim gubicima. Pomične i nepomične ploče izvode se od posebno legiranog aluminija ili mjedi.



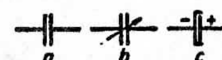
Sl. 51.

62. — Ima promjenljivih kondenzatora i s č v r s t i m dielektrikumom (sl. 52), kao što je na primjer bakelitni papir, trolitul, tinjac i t. d. Radi malog razmaka ploča i velike dielektričke konstante dielektrikuma ovakvi kondenzatori redovito su manji od onih sa zrakom. No njihovi gubici znatno su veći. Zato se ovakvi kondenzatori upotrebljavaju samo ondje, gdje ova njihova mana ne dolazi do izražaja (na primjer kao kondenzatori za reakciju). Kasnije ćemo se osvrnuti i na ostale vrste promjenljivih kondenzatora.



Sl. 52

63. — Ukupni gubici kondenzatora znatno su veći od gubitaka upotrebljenog dielektrikuma. Zanimljivo je usporediti gubitke raznih vrsta kondenzatora. Tu se dakako može govoriti samo o prosječnim vrijednostima. Uz $\omega = 10^7$ imamo na primjer $tg\ \delta$ kod zračnih kondenzatora 2 do $4 \cdot 10^{-4}$, kod kondenzatora s frekventnom kao dielektrikumom $10 \cdot 10^{-4}$, kod malenih valjkastih blokova 40 do $50 \cdot 10^{-4}$, kod običnih blok-kondenzatora 200 do $500 \cdot 10^{-4}$ i kod elektrolitskih kondenzatora veći od $1000 \cdot 10^{-4}$.



Sl. 53.

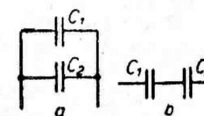
64. — *Normirane znakove* za kondenzatore vidimo na sl. 53. Sl. 53-a označuje normalni čvrsti kondenzator, sl. 53-b promjenljivi kondenzator (promjenljivost označuje strelica), sl. 53-c je znak za elektrolitski kondenzator, kod kojeg vidimo, da je označen i polaritet.

65. — Kapacitet kondenzatora možemo izračunati po jednadžbi:

$$C = \frac{(n-1) \cdot \varepsilon \cdot F}{4\pi \cdot d} \text{ [cm]} = 0{,}08859 \frac{(n-1) \cdot \varepsilon \cdot F}{d} \text{ [pF]} \quad . (33)$$

Tu je ε dielektrička konstanta, F površina ploča u [cm²], n broj ploča, a d razmak ploča u [cm].

66. — Kod p a r a l e l n o g s p a j a n j a kondenzatora (sl. 54) s kapacitetom C_1, C_2, C_3 i t. d., ploče su vezane tako, da se zapravo dobiva povećana površina ploča. Budući da prema jednadžbi (33) veća površina znači i veći kapacitet, kod paralelnog spajanja za ukupni kapacitet: $C = C_1 + C_2 + C_3 \ldots$ ili riječima: *„Kod paralelnog spajanja kondenzatora ukupni kapacitet jednak je sumi kapaciteta pojedinih kondenzatora."* Na ovoj činjenici se osniva i gradnja čvrstih i promjenljivih kondenzatora.



Sl. 54.

67. — S e r i j s k i m s p a j a n j e m kondenzatora umanjuje se ukupni kapacitet (sl. 54-b). Ako naime na serijskom spoju C_1 i C_2 imamo ukupni napon U, tada će za napone na pojedinom od njih vrijediti: $U = U_1 + U_2$. Kako po zakonu influencije na pojedinim pločama imamo istu količinu elektriciteta Q, to uz pomoć poznate jednadžbe $U = Q/C$ za ukupni kapacitet C dobivamo $Q/C = Q/C_1 + Q/C_2$ i dalje: $1/C = 1/C_1 + 1/C_2$, odnosno $C = C_1 \cdot C_2/(C_1 + C_2)$. Riječima: *„Kod serijskog spajanja kondenzatora recipročna vrijednost ukupnog kapaciteta jednaka je sumi recipročnih vrijednosti pojedinih kapaciteta."* Ako oba kondenzatora imaju jednaki kapacitet C', onda će biti: $C = C' \cdot C'/(C' + C')$ odnosno $C = C'/2$. Prilike su, kako vidimo, o b r n u t e od onih kod spajanja otpora i induktiviteta.

Ponavljanje

Promjenljivi kondenzatori omogućuju kontinuirano mijenjanje kapaciteta. Pri tome je kapacitet proporcionalan površini ploča, koje se pokrivaju. Dielektrikum kod kondenzatora je zrak, papir, trolitul, tinjac i slično. Kut gubitaka kondenzatora s čvrstim dielektrikumom redovito je znatno veći od kuta gubitaka kondenzatora sa zrakom. Kapacitet kondenzatora direktno je proporcionalan broju ploča, dielektričkoj konstanti i površini ploča, a obrnuto proporcionalan razmaku ploča. Kod *paralelnog* spajanja kondenzatora pojedini kapaciteti se zbrajaju, a kod *serijskog* spajanja zbrajaju se recipročne vrijednosti pojedinih kapaciteta.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Što je promjenljivi kondenzator? *Odgovor:* Kondenzator s promjenljivim kapacitetom. — *P.*: Kakva su svojstva kondenzatora s čvrstim dielektrikumom? *O.*: Oni su po volumenu mnogo manji od zračnih, ali imaju veće gubitke. — *P.*: Kako se može povećati kapacitet kondenzatora uz isti broj ploča? *O.*: Tako da se uzme malen razmak među pločama i dielektrikum s velikom dielektričkom konstantom, i velika površina ploča. — *P.*: Zašto se kod paralelnog spajanja kondenzatora kapaciteti zbrajaju? *O.*: Zato, što je paralelno spajanje isto što i povećavanje površine ploča. — *P.*: Koliki je ukupni kapacitet dvaju kondenzatora spojenih u seriju? *O.*: $C = C_1 \cdot C_2/(C_1 + C_2)$; C je uvijek manje od najmanjeg pojedinačnog kapaciteta.

Pitanja

22. O čemu je ovisna probojna čvrstoća kondenzatora?
23. Čime se objašnjava veliki kut gubitaka elektrolitskih kondenzatora?
24. Smije li se elektrolitski kondenzator priključiti na izmjenični napon?

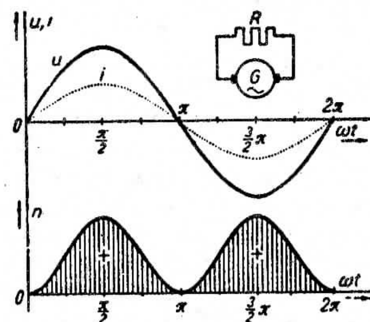
Zadaci

19. Promjenljivi kondenzator sa zračnim dielektrikumom ima 29 ploča međusobno razmaknutih za 0,5 mm. Kolika mora biti površina ploča, da maksimalni kapacitet bude 550 pF?

20 Koliko ploča mora imati kondenzator, koji uz veličinu jedne ploče 25×15 mm i 0,1 mm debeli tinjac kao dielektrikum ($\varepsilon = 7$) mora imati kapacitet od 2 000 pF?

21. Imamo tri kondenzatora s kapacitetom po 1 000 pF. Kakve sve vrijednosti kapaciteta možemo dobiti njihovim spajanjem?

Snaga i radnja izmjenične struje



Sl. 55

68. — Snaga što je istosmjerna struja I proizvede u omskom otporu R (u vatima, dan je, kako je poznato, s $N = U \cdot I = I^2 \cdot R = U^2/R$ [W]. Kod izmjenične struje mogu međutim prilike zbog faznog pomaka između struje i napona biti znatno drugačije. *Momentana* snaga se može uvijek izračunati kao produkt *momentanih* vrijednosti struje i napona, dakle: $n = u \cdot i$. Ako u jednom krugu izmjenične struje imamo samo radni otpor R (na primjer: žarulju, grijalo, i t. d.), tada su prema odsjeku 9.

napon i struja u fazi (sl. 55 gore). Izvedemo li za svaku momentanu vrijednost produkt $u \cdot i$ i ovako dobivene vrijednosti nanesemo grafički, dobivamo krivulju koja prikazuje tok izmjenične snage učina n (sl. 55 dolje). Vidimo da izmjenična snaga pulzira s frekvencijom koja je d v a p u t a v e ć a od frekvencije struje i stalno je pozitivna. Prema odsjeku 5 efektivna vrijednost izmjenične struje odgovara istosmjernoj struji, koja u radnom otporu R proizvede istu količinu topline. To vrijedi i za električku snagu, dakle za odnos toplina : vrijeme. Radnu snagu N za vrijeme čitave periode dobivamo prema odsjeku 5: $N = Q/T = I^2_m \cdot R/2 = U_m \cdot I_m/2 = U_m \cdot I_m/\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}$, to jest za efektivne vrijednosti vrijedi:

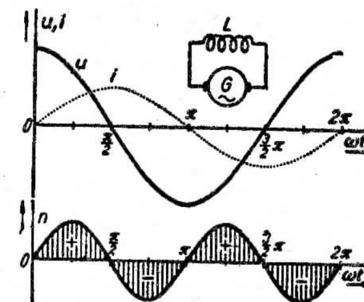
$$\boxed{N = U \cdot I} \quad . \quad . \quad . \quad (34)$$

Za korisnu radnju A imamo:

$$\boxed{A = U \cdot I \cdot t} \quad . \quad . \quad . \quad (35)$$

Izračunavanje radne snage u vatima i korisne radnje u vat-sekundama ovdje je dakle isto kao i kod istosmjerne struje, ako se računa s efektivnim vrijednostima struje i napona.

69. — Ako u krugu izmjenične struje imamo zavojnicu bez otpora s *induktivitetom L*, tada radi faznog pomaka od $+90^0$ između struje i napona ne možemo upotrebiti jednadžbu (34), odnosno (35). Možemo međutim opet za svaki momenat načiniti produkt $n = u \cdot i$, i nacrtati odgovarajuće krivulje (sl. 56). U prvoj četvrtini periode struja i napon su pozitivni, pa je i momentana snaga u svakom momentu pozitivna. U drugoj četvrtini periode napon je negativan, pa je usprkos pozitivnoj struji i momentana snaga negativna. U trećoj četvrtini periode negativni su i napon i struja, pa je njihova snaga opet pozitivna. U četvrtoj četvrtini struja je negativna, pa je i snaga negativna. Momentana snaga je dakle za vrijeme jedne periode izmjenično pozitivna, i negativna, te je srednja vrijednost te snage jednaka nuli. Prema tome ovdje ne možemo kao kod radnog otpora govoriti o pretvorbi električke energije u toplinu. U ovom slučaju postoji naime pretvaranje električke energije u magnetsku, koja se u slijedećoj polovini periode pretvara opet u električku. U prvoj četvrtini periode induktivitet uzima iz generatora stanovitu energiju za izgradnju magnetskog polja, ali tu istu energiju u slijedećoj četvrtini daje natrag generatoru. Ista igra ponavlja se u trećoj i četvrtoj četvrtini periode, i t. d. Vidimo dakle da zavojnica i generator djeluju izmjenično kao potrošači. Električka, odnosno magnetska energija, njiše se između zavojnice i generatora, a da pri tome *ne dolazi do vanjskog trošenja energije* (na primjer u obliku topline).



Sl. 56

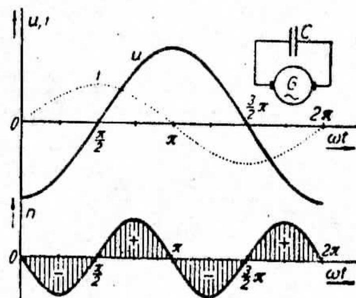
70. — Zbog ovoga govorimo o *induktivnoj praznoj* snazi N_p. Struja, koja teče kroz zavojnicu, naziva se isto tako *praznom* strujom I_p, pa imamo:

$$\boxed{N_p = U \cdot I_p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (36)$$

Zbog istog razloga nazvali smo i induktivni otpor u odsjeku 17. praznim. Oznaka „prazni" treba nas uvijek upozoravati na činjenicu, da se energija ne odaje prema van, nego da čitava ostaje u *krugu izmjenične struje*. Uvrstimo li za napon U na priključnicama vrijednost u voltima, a za praznu struju I_p vrijednost u amperima, dobivamo snagu u praznim vatima; mjesto toga ovu praznu snagu možemo izraziti u *volt-amperima* [VA]. Za praznu *radnju* A_p imamo izraz:

$$\boxed{A_p = U \cdot I_p \cdot t} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (37)$$

Prazna radnja mjeri se u praznim vat-satima [pWh] ili praznim kilovat-satima [pkWh].



Sl. 57.

71. — Imamo li u krugu izmjenične struje kondenzator bez gubitaka *kapaciteta C*, odnosi su slični. Prema odsjeku 32. ovdje napon zaostaje za strujom za —90°. Nacrtamo li, uzimajući u obzir fazni pomak, iste krivulje kao kod induktiviteta, dobivamo sl. 57. Vidimo da se i ovdje momentana vrijednost snage mijenja s dvostrukom frekvencijom izmjenične struje, i da je naizmjence pozitivna i negativna. I ovdje kondenzator i generator također djeluju izmjenično kao potrošači. Električka energija njiše se stalno između jednoga i drugoga. Ovdje se radi o izmjeničnom procesu bez gubitaka: za vrijeme prve četvrtine periode kondenzator se izbije i svoju električku energiju daje natrag generatoru, dok se za vrijeme druge četvrtine periode nabija, uzimajući za to potrebnu energiju iz generatora. Isto kao i kod zavojnice, ni kod kondenzatora ne dolazi do *vanjskog trošenja energije*, pa govorimo o *kapacitivnoj praznoj snazi* N_p, *kapacitivnoj praznoj radnji* A_p i *kapacitivnoj praznoj struji* I_p. Jednadžbe (36) i (37) vrijede i ovdje.

Ponavljanje

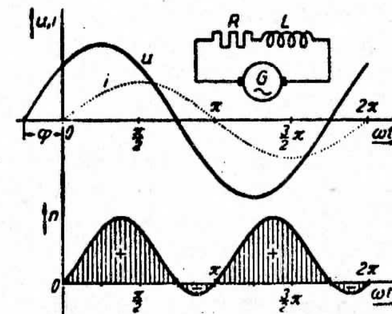
Snaga što je izmjenična struja daje radnom otporu, dakle *radna snaga* (isto vrijedi i za radnju), može se isto, kao i kod istosmjerne struje, izračunati, ako se za struju i napon stave efektivne vrijednosti: $N = U \cdot I$, odnosno $A = U \cdot I \cdot t$. Teče li međutim izmjenična struja kroz kapacitet, odnosno zavojnicu, nema odavanja energije prema van. Energija se stalno njiše unutar kruga izmjenične struje, pa govorimo o *induktivnoj* ili *kapacitivnoj praznoj snazi*,

odnosno *praznoj radnji*: $N_p = U \cdot I_p$, odnosno $A_p = U \cdot I_p \cdot t$. Prazna snaga mjeri se u praznim vatima, a prazna radnja u praznim vat-satima. Struja, koja u ovom slučaju teče kroz kapacitet, odnosno induktivitet, naziva se praznom strujom I_p.

Pitanja i odgovori

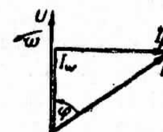
Pitanje: Kolika je snaga, koja se troši u radnom otporu? *Odgovor:* $N = U \cdot I$ [W]. — *P.:* Kako se iz radne snage može izračunati radnja? *O.:* Radnu snagu treba pomnožiti vremenom: $A = N \cdot t = U \cdot I \cdot t$ [Ws]. — *P.:* Kolika je prazna snaga u induktivitetu, odnosno kapacitetu? *O.:* $N_p = U \cdot I_p$. — *P.:* Zašto izmjenični napon u ovom slučaju nazivamo praznim? *O.:* Zato, što se ova snaga ne troši vani, nego ostaje u krugu izmjenične struje. — *P.:* Čime se objašnjava ova čudna činjenica? *O.:* Snaga proizvedena u svakoj četvrtini periode protivna je i međusobno jednaka. Ukupna snaga za vrijeme jedne poluperiode, odnosno cijele periode, prema tome, jednaka je nuli. Generator i zavojnica, odnosno kondenzator, djeluju izmjenično kao potrošači.

72. — Sada dolazimo do slučaja, kad između struje i napona postoji pomak u fazi manji od 90°, do slučaja serijskog spoja induktiviteta i radnog otpora. Na sl. 58. imamo nacrtanu krivulju struje i napona uz kut pomaka $\varphi = +45°$. Nacrtajmo opet krivulju za momentane snage $n = e \cdot i$, pa ćemo vidjeti, da će i u ovom slučaju krivulja snage pulzirati dvostrukom frekvencijom. Što je međutim kut pomaka manji, to je veći udio pozitivne snage. Krivulja nacrtana na sl. 58. za $\varphi = +45°$ pokazuje, da je pozitivni udio snage mnogo veći od negativnog. Za srednju vrijednost ukupne snage ne može se sada više uzeti kao prije, kad se radilo o praznoj snazi, da je jednaka nuli, pa ovdje mora doći do odavanja radne snage.



Sl. 58.

73. — U stvarnoj radnoj snazi može imati udjela samo radna struja I_w (vidi odsjek 68). Ukupna struja I, koja stvarno teče, sastoji se od radne struje I_w i prazne struje I_p. Isto onako, kako smo, na primjer, na sl. 18. i 30. crtali trokut napona, možemo sada nacrtati trokut struje. Pri tome dakako moramo uvijek paziti na fazne odnose. Obrnuto, ukupnu struju možemo rastaviti na dvije komponente, koje su međusobno okomite (sl. 59). Radna struja I_w u fazi je s naponom U, dok je prazna struja prema tome naponu pomaknuta za 90°. Iz sl. 59. za radnu, odnosno praznu struju imamo:



Sl. 59.

$$\boxed{I_w = I \cdot \cos\varphi} \; ; \; \boxed{I_p = I \cdot \sin\varphi} \quad . \quad . \quad . \quad (38)$$

Za radnu snagu imamo: $N = U \cdot I_w$ ili, uzevši u obzir jednadžbu (38):

$$\boxed{N = U \cdot I \cdot \cos\varphi} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (39)$$

Ova jednadžba vrijedi za bilo koji fazni kut, ali jedino za sinusoidalne izmjenične struje. Fazni pomak smije biti negativan, jer je $cos(-\varphi) = cos\ \varphi$. Za struju i napon moraju se uvrstiti efektivne vrijednosti. Za čiste radne otpore je $\varphi = 0^\circ$, dakle $N = U \cdot I$ (jednadžba 34). Za čisti prazni otpor imamo zbog $\varphi = +90^\circ$, odnosno -90°, radnu snagu $N = U \cdot I \cdot 0 = 0$ (samo prazna snaga).

74. — Izračunavanje snage kod izmjenične struje razlikuje se od izračunavanja kod istosmjerne struje vrijednošću $cos\ \varphi$, faktora, koji nazivamo **faktorom snage**. Produkt $N_s = U \cdot I$ naziva se **prividnom snagom** i izražava u *volt-amperima* [VA] ili *kilo-volt-amperima* [kVA]. Prividna snaga je važna za strojeve, koji daju struju, dok je *radna snaga = prividna snaga* $\times$ *cos* φ; to je snaga, koja se vani može iskoristiti. Radna snaga izražava se prema jednadžbi (39) u *vatima = voltamperi* $\times$ $\times$ *cos* φ ([W] = [VA · cos φ]) odnosno *kilovatima = kilo-voltamperima* $\times$ *cos* φ ([kW] = [kVA · cos φ]).



Sl. 60.

75. — Uz radnu i prividnu snagu postoji i prazna snaga (vidi odsjek 70 i 71). Ove tri vrste snage dadu se složiti u pravokutni *trokut snaga* (sl. 60), u kome je prividna snaga N_s hipotenuza, a radna snaga N i prazna snaga N_p obje katete. Kako se vidi, ovdje se radi o običnom trokutu struje pomnoženom sa zajedničkim naponom U prema sl. 59. Iz trokuta snaga imamo:

$$N_s = \sqrt{N^2 + N_p^2} \qquad (40)$$

76. — Što je fazni kut veći, to veća je prazna, a manja radna snaga, jer je tada *cos* φ malen. Ova činjenica se može u elektrotehnici vrlo neugodno odraziti, jer su korisne snage, što ih generator u ovakvim slučajevima može dati, malene usprkos tome, što kroz namotaj teku vrlo jake prazne struje. Najveći dio energije njiše se pri tome u vodu ne dajući nikakvog pridonosa korisnoj radnji. Radi toga je u elektrotehnici poželjno imati što veću vrijednost za *cos* φ (najčešće 0,8). Da se to postigne, ugrađuju se u mreže i posebni uređaji. U radiotehnici je često baš obrnut slučaj. Tu se želi (na primjer u titrajnim krugovima) imati φ približno jednak 90°, odnosno $cos\ \varphi = 0$, kako bi u krugu bilo što manje radne, a što više prazne snage.

77. — **Primjer**: Induktivitet veličine 0,1 H vezan je u seriju s radnim otporom 10 Ω, a na ovom spoju leži napon 220 V, 50 Hz. Kolika je radna, prazna i prividna snaga? **Rješenje**: Zadano je $L = 0{,}1$ H, $R = 10\ \Omega$, $U = 220$ V, $\omega = 2\pi f = 100\pi$, a traži se N, N_p i N_s. Ukupnu struju I imamo iz jednadžbe (21): $I = U/Z = U/\sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = 220/\sqrt{1087} = 6{,}67$ A. Dalje iz jednadžbe (18) slijedi: $tg\ \varphi = \omega L/R = 10\pi/10 = \pi = 3{,}1416$, dakle, $\varphi = 72^\circ 21'$, t. j. $cos\ \varphi = 0{,}3032$, a $sin\ \varphi$ 0,9529. Odavle prema jednadžbi (39) imamo za radnu snagu $N = 220 \cdot 6{,}67 \cdot 0{,}3032 = 455$ W = 0,455 kW. Prazna snaga je prema jednadžbi (36) i (38): $N_p = U \cdot I_p = U \cdot I \cdot sin\ \varphi = 220 \cdot 6{,}67 \cdot 0{,}9529 = 1398$ W = 1,398 kW. Konačno prema odsjeku 74. za prividnu snagu imamo $N_s = U \cdot I = 220 \cdot 6{,}67 = 1467$ VA = 1,467 kVA.

Pokus prema jednadžbi (40) posvema potvrđuje gornje rezultate: $N_s = \sqrt{0{,}445^2 + 1{,}398^2} = 1{,}468$ kVA. Zbog velikog faznog pomaka raspoloživa radna snaga u odnosu prema praznoj prilično je malena.

Ponavljanje

Imamo li u krugu izmjenične struje napon U i struju I pomaknute međusobno u fazi za bilo kakav kut φ, to je radna snaga, što ju takav krug može odavati van: $N = U \cdot I \cdot cos\ \varphi$. Radna snaga mjeri se u *vatima = volt-amperi* $\times$ *cos* φ. Produkt $U \cdot I$ naziva se prividna snaga N_s i mjeri u *volt-amperima* [VA]. Prema tome je *radna snaga = prividna snaga* $\times$ *cos* φ. Između prividne, radne i prazne snage postoji odnos: $N_s = \sqrt{N^2 + N_p^2}$. *Faktor snage cos* φ nastoji se u elektrotehnici držati što većim, a u radiotehnici što manjim. Struja, koja određuje ukupnu snagu I, može se uz pomoć trokuta struje rastaviti u radnu komponentu $I_w = I \cdot cos\ \varphi$ i praznu komponentu $I_p = I \cdot sin\ \varphi$.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kako se izračunava radna snaga kod bilo kakvog faznog pomaka između struje i napona? *Odgovor:* $N = U \cdot I \cdot cos\ \varphi$. — *P.*: Kojim jedinicama se mjeri radna snaga? *O.*: Vatima [W] i kilovatima [kW]. — *P.*: Ukoliko se ove jedinice razlikuju od onih za istosmjernu struju. *O.*: Kod istosmjerne struje je vat = volt $\times$ amper, a kod izmjenične struje *vat = volt* $\times$ $\times$ *amper* $\times$ *cos* φ. — *P.*: Kako se izračuna prividna snaga, i u kojim jedinicama se mjeri? *O.*: Prividna snaga je produkt efektivnog napona i efektivne jakosti struje ($N_s = U \cdot I$), a mjeri se u voltamperima [VA] ili kilovoltamperima [kVA]. — *P.*: Kakav odnos postoji između prividne radne i prazne snage? *O.*: Prividna snaga jednaka je kvadratnom korijenu sume radne i prazne snage.

Pitanja

25. Da li postoji kod prazne snage, odnosno prazne radnje, protivurječnost s općenitim zakonima energije?

26. Kako se može izračunati faktor snage **cos** φ iz radne i prividne snage?

27. Kojim jedinicama se mjeri radna, prividna i prazna snaga?

Zadaci

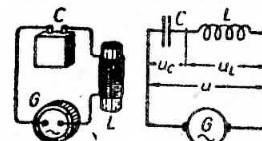
22. Kondenzator kapaciteta 0,1 μF priključen je na mrežu izmjeničnog napona 220 V, 50 Hz. Kolika je prividna, radna i prazna snaga?

23. Pretvori 100.000 Ws u kWh!

24. Radio-prijemnik priključen na mrežu izmjeničnog napona 220 V troši 0,22 A, a pri tome je faktor snage 0,9. Koliki je njegov potrošak i koliko stoji njegov desetsatni pogon, ako je cijena kilovatsatu 3 Din.?

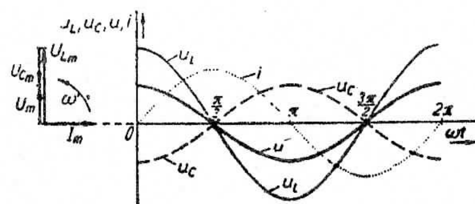
Serijski spoj radnog otpora, induktiviteta i kapaciteta u krugu izmjenične struje

78. — U radiotehnici imaju krugovi s radnim otporom, induktivitetom i kapacitetom vrlo važnu ulogu, jer se na njima osnivaju titrajni krugovi, filteri i t. d. Pogledat ćemo najprije *serijski spoj induktiviteta i kapaciteta* (sl. 61), uzimajući pri tome da je u početku radni otpor $R = 0$. Da struja kroz ovaj spoj može teći, mora na priključnicama postojati stanoviti napon. Ukupni *momentani* napon

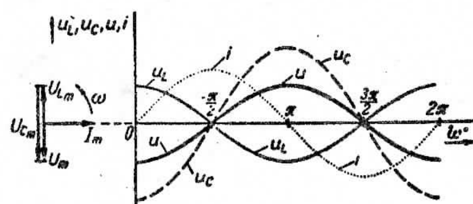


Sl. 61.

u na priključnicama jednak je sumi *momentanih* djelomičnih napona na induktivitetu i kapacitetu: $u = u_L + u_C$ Prema odsjeku 15. i 32. napon na induktivitetu u_L prethodi struji i za četvrtinu periode, dok napon na kapacitetu u_C za četvrtinu periode zaostaje za strujom. Između ovih dvaju napona postoji dakle razlika u fazi 180°, to jest pola periode. Na sl. 62. nacrtane su sinusoide za u_L, u_C i i, i to za slučaj, da je u u_L veće od u_C. *Geometrijskim* zbrajanjem vrijednosti u_L i u_C dobivamo krivulju za napon u na priključnicama. Odavle vidimo, da je napon u u fazi *s naponom* u_L, i da p r e t h o d i struji i za četvrtinu periode. Na sl. 63. vidimo iste krivulje za slučaj, da je u_L manje od u_C. U tom slučaju napon u na priključnicama z a o s t a j e za strujom i za četvrtinu periode i u fazi je s naponom u_C.



Sl. 62.



Sl. 63.

79. — Na sl. 62. i 63. nacrtani su također i vektori, koji prikazuju struju, odnosno napone. Vektor I_m nacrtan je horizontalno, induktivni pad napona U_{Lm} okomit je na struju i zakrenut za kut $+ 90°$, dakle usmjeren je prema gore. Kao i kod zbrajanja sila u mehanici, tako i ovdje vektor, koji prikazuje kapacitivni pad napona U_{Cm} ima svoj početak u krajnjoj točki vektora U_{Lm} i usmjeren je okomito na struju prema dolje, jer kut pomaka napona U_{Cm} prema I_m iznosi $-90°$, te između U_{Lm} i U_{Cm} postoji fazni pomak od 180°. Spojnica krajnje točke vektora U_{Cm} s početkom vektora U_{Lm} daje vektor rezultantnog napona U_m. Prema prije obrađenim pravilima (vidi odsjek 18 i 30), smjer obilaženja ovog vektora protivan je smjeru obilaženja ostalih vektora. Iz vektorskog prikaza na sl. 62. i 63. slijedi dalje, da je: $U_m = U_{Lm} - U_{Cm} = U_{Cm} - U_{Lm}$, ili za efektivne vrijednosti: $U = U_L - U_C = U_C - U_L$. *Kako efektivna vrijednost* (po definiciji) *ne može nikada biti negativna,* moramo vrijednost za U *odabrati uvijek pozitivnom.* To se označuje dvjema okomitim crtama, te je ono, što se nalazi među crtama „apsolutna vrijednost".

$$U = |(U_L - U_C)| \quad . \quad . \quad . \quad (41)$$

(Ako je dakle U_L veće od U_C, tada je $(U_L - U_C)$ zapravo negativno; no usprkos tome diferenciju $(U_L - U_C)$ moramo uzeti pozitivnom. Apsolutna vrijednost broja ili izraza jednaka je stvarnoj vrijednosti neovisno o predznaku.) Efektivni napon na priključnicama jednak je dakle pozitivnoj *diferenciji* efektivnih vrijednosti pojedinih napona. Ovdje imamo zanimljiv slučaj, da je napon na priključnicama manji od sume pojedinih napona, a da pojedinačni naponi mogu biti i znatno veći od ukupnog napona. Veličine L i C mogu se izabrati i takve, da U_L bude jednako U_C, da je dakle $U = 0$. U tom slučaju se radi o *„serijskoj rezonanciji"*, o kojoj ćemo govoriti opširnije u odsjeku 92., jer ona predstavlja jednu od najvažnijih osnova radiotehnike.

80. — Ukupni prazni otpor X serijskog spoja praznih otpora $X_L = \omega L$ i $X_C = 1/\omega C$ dobivamo iz jednadžbi (41), (17) i (24): $I \cdot X = [I \cdot \omega L - (I/\omega C)]$. Za apsolutnu vrijednost veličine X imamo dakle:

$$X = \left| \omega L - \frac{1}{\omega C} \right| \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (42)$$

Ako je ωL veće od $1/\omega C$, prevladava induktivitet (sl. 62.); fazni kut između struje I i napona U je tada $\varphi = + \pi/2$ ili $+ 90°$. Ako je pak ωL manje od $1/\omega C$, prevladava kapacitet (sl. 63); fazni kut je u tom slučaju $\varphi = - \pi/2$ odnosno $-90°$. Konačno iz Ohmovog zakona imamo:

$$U = I \cdot X = I \cdot \left| \omega L - \frac{1}{\omega C} \right| \quad . \quad . \quad . \quad (43)$$

81. — P r i m j e r: Induktivitet 10 H spojen je u seriju s kapacitetom 1 μF i priključen na mrežu izmjeničnog napona 220 V, 50 Hz. Koliki su: a) djelomični prazni naponi, b) ukupni prazni otpor, c) jakost struje, d) djelomični naponi? R j e š e n j e: Zadano je $L = 10$ H, $C = 1\ \mu F = 10^{-6}$ F, $U = 220$ V, $\omega = 2\pi f = 100\pi$, traži se X_L, X_C, X, I, U_L i U_C. Iz jednadžbe (16) je: $X_L = \omega L = 100\pi \cdot 10 = 3142\ \Omega$. Iz jednadžbe (23) imamo: $X_C = 1/\omega C = 1/100\pi \cdot 10^{-6} = 3183\ \Omega$. Za apsolutnu vrijednost ukupnog praznog otpora X imamo iz jednadžbe (42): $X = |(3142 - 3183| = 41\ \Omega$. Budući da je X_L manje od X_C, u spoju prevladava kapacitet, što znači, da će napon na priključnicama U zaostajati za strujom I za 90°. Potrebno je primijetiti, da je ukupni prazni otpor vrlo malen, a ne možda jednak sumi pojedinih otpora. Jakost struje I dobivamo iz jednadžbe (43): $I = U/X = 220/41 = 5{,}37$ A. Time su određeni i djelomični naponi $U_L = I \cdot X_L = 5{,}37 \cdot 3142 = 16873$ V i $U_C = I \cdot X_C = 5{,}37 \cdot 3183 = 17093$ V. Iako je ukupni napon na priključnicama samo 220 V, na L i C imamo ogromne napone. Rezultate možemo provjeriti jednadžbom (41): $U = |(16873 - 17093)| = 220$ V.

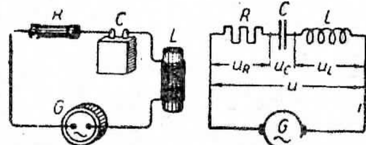
Ponavljanje

Kod *serijskog spoja induktiviteta i kapaciteta* mora se uzeti da je ukupni napon uvijek p o z i t i v a n, iako je dan diferencijom, koja može biti i negativna: $U = |(U_L - U_C)|$. Pojedinačni naponi mogu imati znatno veću vrijednost od ukupnog napona. U slučaju *„serijske rezonancije"* djelomični naponi su međusobno jednaki, a ukupni napon jednak je nuli. Prazni otpor serijskog spoja induktiviteta i kapaciteta jednak je diferenciji pojedinih otpora: za ovu diferenciju također se mora uzeti, da je uvijek pozitivna: $X = |\omega L - (1/\omega C)|$. Prema Ohmovom zakonu je onda: $U = I \cdot X$.

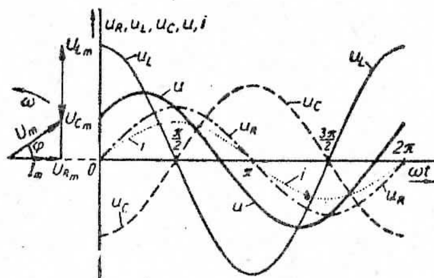
Pitanja i odgovori

Pitanje: Kolika je momentana vrijednost napona na priključnicama serijskog spoja induktiviteta i kapaciteta? *Odgovor:* Jednaka je sumi momentanih vrijednosti napona na kapacitetu i induktivitetu. — *P.:* Koliki je efektivni napon na priključnicama spoja? *O.:* Jednak je diferenciji obaju djelomičnih efektivnih napona. — *P.:* Na koje pravilo u pogledu predznaka treba pri tome paziti? *O.:* Mora se uzeti, da je diferencija obaju djelomičnih napona uvijek pozitivna, jer negativna efektivna vrijednost nema nikakvog smisla. — *P.:* Što je naročito napadno u vezi s naponima? *O.:* Pojedinačni naponi mogu biti znatno veći od ukupnog napona na priključnicama. Kod „serijske resonancije" je štoviše ukupni napon na priključnicama jednak nuli. — *P.:* Koliki je ukupni prividni otpor serijskog spoja induktiviteta i kapaciteta? *O.:* Jednak je diferenciji induktivnog i kapacitivnog otpora; pri tome se mora uzeti, da je ova diferencija uvijek pozitivna.

82. — Nakon ovih priprava konačno možemo pristupiti i razmatranju slučaja, kad u krugu izmjenične struje imamo *serijski spoj radnog otpora, induktiviteta i kapaciteta* (sl. 64). I ovdje dakako, da struja uopće može teći, moramo na radnom otporu R, kapacitetu C i induktivitetu L imati napone. Označimo li ove djelomične napone redom s u_R, u_L i u_C tada je, prema odsjeku 78. *momentana* vrijednost ukupnog napona dana sa: $u = u_R + u_L + u_C$. Pri tome je napon u_R na radnom otporu u fazi sa strujom i, induktivni napon u_L prethodi struji i za četvrtinu periode, a kapacitivni u_C zaostaje za strujom i za isto toliko. Na sl. 65. nacrtane su opet odgovarajuće sinusoide, iz kojih je *geometrijskim* zbrajanjem triju pojedinačnih napona u_R, u_L, u_C dobiven momentani napon u na priključnicama. Kako se iz te slike može lako vidjeti, napon u nije u fazi ni s jednim djelomičnim naponom, i prethodi struji i za manje od četvrtinu periode. Budući da je u ovom slučaju u_L veće od u_C, čitavi spoj se vlada induktivno.



Sl. 64.



Sl. 65.

83. — Na sl. 65. lijevo imamo čitav problem prikazan vektorski. Vektor struje I_m nacrtan je horizontalno i u fazi s naponom na radnom otporu U_{Rm}. Od krajnje točke otpora U_{Rm} okomito prema gore ($\varphi = +90^0$) nanesen je induktivni napon U_{Lm}, dok je kapacitivni napon U_{Cm} ($\varphi = -90^0$) od krajnje točke vektora U_{Lm} nanesen prema dolje. Između ova dva napona postoji dakle razlika u fazi od 180^0. Spojnica početne točke vektora U_{Rm} i krajnje točke vektora U_{Cm} daje vektor U_m, koji predstavlja ukupni napon na priključnicama. Smjer vektora U_m i ovdje je protivan smjeru obilaženja ostalih dvaju vektora. Ukupni napon U_m može se izračunati iz pravokutnog trokuta i to iz kateta U_{Rm} i ($U_{Lm} - U_{Cm}$). Imamo naime: $U_m^2 = U_{Rm}^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2$, ili za efektivne vrijednosti:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (44)$$

I ovdje bi dakle bilo posve krivo efektivne vrijednosti pojedinih napona zbrajati algebarski; zbrajanje se opet mora provesti *geometrijski*. Za slučaj da je $R = 0$, imamo iz jednadžbe (44) nama već poznatu jednadžbu (41). Da bi napon U bio pozitivan, predznak vrijednosti pod korijenom u jednadžbi (44) moramo uzeti da je uvijek pozitivan.

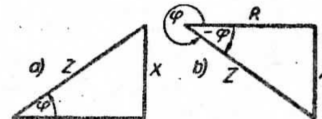
84. — Pomoću Ohmovog zakona imamo iz jednadžbe (44) za prividni otpor ili impedanciju Z serijskog spoja R, L i C: $I \cdot Z = \sqrt{I^2 \cdot R^2 + [I \cdot \omega L - (I/\omega C)]^2}$ ili podijelivši s I:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (45)$$

Prema jednadžbi (42) možemo također pisati:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (46)$$

I ovdje mora korijen dakako biti uvijek *pozitivan*. Za $R = 0$ dobivamo jednadžbu (42). Impedanciju Z možemo odrediti posve grafički iz trokuta otpora (sl. 66). Vodoravna kateta jednaka je radnom otporu R, a okomita praznom otporu $X = \omega L - (1/\omega C)$, dok hipotenuza predstavlja traženu impedanciju Z. Prevladava li induktivni otpor ωL, otpor X je veći od 0, to jest pozitivan (sl. 66-a); u obrnutom slučaju je otpor X više kapacitivan, dakle je X manje od 0, to jest negativno (sl. 66.-b).



Sl. 66.

85. — Za fazni kut dobivamo iz sl. 66.:

$$tg\,\varphi = \frac{X}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad . \quad . \quad . \quad (47)$$

Za ωL veće od $1/\omega C$ imamo pozitivnu, a za ωL manje od $1/\omega C$ negativnu vrijednost za $tg\,\varphi$. Konačno iz Ohmovog zakona prema jednadžbama (45) i (46) dobivamo:

$$U = I \cdot Z = I \cdot \sqrt{R^2 + X^2} = I \cdot \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (48)$$

Ovo je najopćenitiji oblik Ohmovog zakona za istosmjernu i izmjeničnu struju. Za vrijednost pod korijenom vrijedi dakako

opet samo *pozitivni* predznak. Kao specijalne slučajeve dobivamo: za $R = 0$ jednadžba (43), za $L = 0$ jednadžba (28), a za $C = \infty$ jednadžba (21).

86. — Primjer: Na koliki napon se mora priključiti serijski spoj radnog otpora 1 kΩ, induktiviteta 20 H i kapaciteta 1 μF uz frekvenciju 50 Hz, da struja iznosi 10 mA, i koliki je pri tome fazni pomak? Rješenje: Zadano je $R = 1\ k\Omega = 1.000\ \Omega$, $L = 20\ H$, $C = 1\ \mu F = 10^{-6}\ F$, $\omega = 2\pi f = 100\ \pi$, $I = 10\ mA = 0{,}01\ A$, a traži se U i φ. Iz jednadžbe (48) imamo: $U = 0{,}01 \sqrt{10^6 + [2000\pi - (1/100\pi \cdot 10^{-6})]^2} = 0{,}01 \sqrt{10^6 + (6283 - 3183)^2} = 0{,}01 \sqrt{10^6 + 3100^2} = 0{,}01 \sqrt{10{,}61 \cdot 10^6} = 32{,}6\ V$. Iz jednadžbe (47) imamo: $tg\ \varphi = (6283 - 3183)/1000 = 3{,}100$, dakle $\varphi = 72^0\, 7'$. Kako je $\omega L = 6283$ veće od $1/\omega C = 3183$, fazni kut je pozitivan, a serijski spoj djeluje induktivno.

Ponavljanje

Kod *serijskog spoja radnog otpora, induktiviteta i kapaciteta* momentana vrijednost napona na priključnicama jednaka je algebarskoj sumi momentanih vrijednosti pojedinih napona, dok je efektivna vrijednost napona na priključnicama jednaka geometrijskoj sumi napona; dakle: $U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$. Isto tako je impedancija Z ovog serijskog spoja jednaka geometrijskoj sumi pojedinih otpora: $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + [\omega L - (1/\omega C)]^2}$, dok za fazni kut φ između napona U na priključnicama i struje I vrijedi: $tg\ \varphi = X/R = [\omega L - (1/\omega C)]/R$. Iz ovoga slijedi najopćenitiji odblik Ohmovog zakona za izmjeničnu i istosmjernu struju: $U = I \cdot Z = I \cdot \sqrt{R^2 + X^2}$

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kako se kod serijskog spoja radnog otpora, induktiviteta i kapaciteta sastavlja ukupni napon na priključnicama iz pojedinačnih napona? *Odgovor:* Ukupni *efektivni* napon jednak je *geometrijskoj* sumi pojedinih efektivnih napona. *Momentana* vrijednost ukupnog napona jednaka je međutim algebarskoj sumi momentanih vrijednosti pojedinih napona. — *P.*: Kako se vrši geometrijsko zbrajanje napona? *O.*: Grafičkim nanošenjem pojedinih napona, pazeći pri tome na fazne odnose. Zaključna linija ovako dobivenog vektorskog prikaza je rezultantni napon. — *P.*: Kako se može odrediti impedancija spomenutog serijskog spoja? *O.*: Grafički i računski iz trokuta otpora. Pri tome je X ukupni otpor, a ukupna impedancija je dana sa: $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$. — *P.*: Što je potrebno reći o kutu faznog pomaka? *O.*: Prevladava li induktivni otpor, tada je $tg\ \varphi$, a prema tome i sam φ pozitivan, dok je u protivnom slučaju i jedno i drugo negativno. — *P.*: Kako glasi Ohmov zakon u općem obliku. *O.*: $U = I \cdot Z = I \cdot \sqrt{R^2 + X^2}$. — *P.*: Što pri tome znači X? *O.*: Ukupni prazni otpor serijskog spoja.

Pitanja

28. Kada se izmjenični naponi smiju zbrajati geometrijski, a kada algebarski?

29. Kako se može lako odrediti napon na priključnicama, impedancija i fazni kut serijskog spoja radnog i praznog otpora?

30. U kojim jedinicama treba uvrstiti pojedine veličine u opći Ohmov zakon?

Zadaci

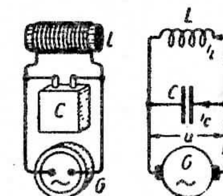
25. U jednom filterskom uređaju imamo serijski spoj kapaciteta 3 000 pF, induktiviteta 5 H i stanovitog radnog otpora. Koliki mora biti taj otpor, da ovaj uređaj predstavlja za frekvenciju 1 kHz impedanciju 30 kΩ?

26. U krugu izmjenične struje imamo serijski spoj induktiviteta 1 mH, kapaciteta 500 pF i radnog otpora 100 Ω. Koliki je fazni kut i kut gubitaka zavojnice kod frekvencije 500 kHz, ako je radni otpor zamišljen kao otpor zavojnice spomenutog induktiviteta?

27. Koliki prazni otpor moramo kod frekvencije 50 Hz spojiti u seriju s radnim otporom od 50 Ω, da fazni kut ovog kruga bude -45^0?

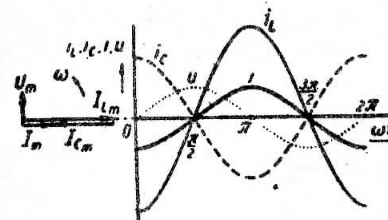
Paralelni spoj induktiviteta i kapaciteta u krugu izmjenične struje

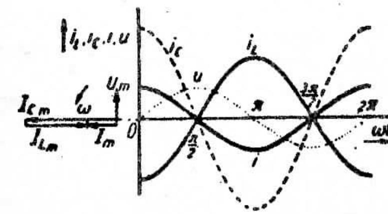
87. — U dosadašnjim razmatranjima bavili smo se serijskim spojem radnog i praznog otpora, gdje se je pretpostavljalo da je struja zadana, a bilo je potrebno izračunati padove napona na svakom od ovih otpora. Kod paralelnog spajanja leže svi otpori na istom naponu, kako se to, na primjer, vidi na sl. 67., koja prikazuje *paralelni spoj induktiviteta L i kapaciteta C*. Prema prvom Kirchhoffovom zakonu momentana vrijednost ukupne struje i mora biti jednaka algebarskoj sumi *momentanih* vrijednosti pojedinih struja: $i = i_1 + i_2 + i_3 + \ldots$. Efektivna, odnosno tjemena vrijednost bit će i u ovom slučaju jednaka *geometrijskoj* sumi efektivnih, odnosno tjemenih vrijednosti pojedinih struja. Kod paralelnog spoja vrijede dakle za struju isti zakoni, koji kod serijskog spoja vrijede za napon.



Sl. 67.

88. — Sada ćemo promatrati spoj na sl. 67. uz pretpostavku da u krugu nemamo radnog otpora, to jest da je $R = 0$. Za momentane vrijednosti struje prema onome što je gore rečeno vrijedi $i = i_L + i_C$, ako nam i_L, odnosno i_C označuje momentane vrijednosti struje, koja teče kroz induktivitet L, odnosno kroz kapacitet C. Na sl. 68. imamo nacrtane krivulje za slučaj, da je i_L veće od i_C. Prema odsjeku 15. zaostajat će struja i_L za naponom za četvrtinu periode, dok će struja i_C, prema odsjeku 32. prethoditi naponu u također za četvrtinu periode. Između struje i_L i i_C postoji dakle pomak u fazi za pola periode, dakle za π, odnosno 180^0. Nacrtamo li opet sumu momentanih vrijednosti za i_L i i_C, dobivamo sinusoidu, koja prikazuje tok ukupne struje i. Iz tih krivulja vi-


Sl. 68.


Sl. 69.

dimo, da je struja I u fazi sa strujom I_L, i da zaostaje za naponom u na priključnicama za četvrtinu periode. Paralelni spoj djeluje dakle u ovom slučaju induktivno. Na sl. 69. imamo nacrtane krivulje za slučaj, kada je I_L manje od I_C. Tu je struja I u fazi sa strujom I_C i prethodi naponu u za četvrtinu periode, tako da sada čitavi spoj djeluje kapacitivno.

89. — Obje slike imaju osim toga i vektorski prikaz. Vektor U_m crtan je kao i dosada okomito, jer je izbor početnog položaja, kako znamo, posve slobodan. Vektor struje I_{Lm} bit će sada prema sl. 12. vodoravan i usmjeren na desno, dok će vektor struje I_{Cm}, koja teče kroz kondenzator, prema sl. 24. biti vodoravan i okrenut na lijevo. *Geometrijski* zbroj vektora I_{Lm} i I_{Cm} daje rezultirajući vektor ukupne struje I_m. Iz ovog vektorskog prikaza slijedi odmah da je tjemena, odnosno efektivna vrijednost ukupne struje jednaka *diferenciji* tjemenih, odnosno efektivnih vrijednosti pojedinih struja:

$$I = |(I_L - I_C)| \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (49)$$

I ovdje dakako moramo uvijek uzeti, da je diferencija *pozitivna*, jer negativna efektivna vrijednost nema nikakvog smisla. Dalje vidimo, da ukupna struja može biti manja od sume pojedinih struja, a ove pojedinačno mogu biti veće od ukupne struje. Prikladnim izborom vrijednosti za L i C može se štoviše postići, da bude $I_L = I_C$, a tada je $I = 0$. U takvom slučaju se radi o *„paralelnoj rezonanciji"*, na koju ćemo se detaljnije osvrnuti u odsjeku 101.

90. — Za izračunavanje vrijednosti otpora X paralelnog spoja obaju *praznih otpora* X_L i X_C, dakle za izračunavanje otpora „titrajnog kruga", koji je u tehnici tako važan, možemo poći od jednadžbe (49). Prema Ohmovom zakonu tada za apsolutne vrijednosti vrijedi: $U/X = |(U/X_L) - (U/X_C)|$, to jest $I/X = |(I/X_L) - (I/X_C)|$, ili $X = |X_L \cdot X_C/(X_C - X_L)|$. Prema tome je *vodljivost* $Y = I/X$ *ukupnog praznog otpora jednaka pozitivnoj diferenciji pojedinih vodljivosti*. Stavimo li sada da je $X_L = \omega L$, a $X_C = I/\omega C$, imamo $X = |(\omega L/\omega C)/[(1/\omega C) - \omega L]|$ iz čega proširivanjem razlomka sa C/L dobivamo:

$$X = \left| \frac{I}{\frac{I}{\omega L} - \omega C} \right| \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (50)$$

Iz ovoga prema Ohmovom zakonu dalje slijedi:

$$U = I \cdot X = I \cdot \left| \frac{I}{\frac{I}{\omega L} - \omega C} \right| \quad . \quad . \quad (51)$$

91. — Primjer: Zavojnica s induktivitetom 0,1 mH spojena je paralelno s kondenzatorom od 200 pF, pa je ovaj titrajni krug priključen na napon 200 V i 1 MHz. Koliki je a) ukupni otpor, b) ukupna struja,

c) obje struje pojedinačno? Rješenje: Zadano je $L = 0{,}1$ mH $= 10^{-4}$ H, $C = 200$ pF $= 2 \cdot 10^{-10}$ F, $U = 200$ V, $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 10^6$, a traži se X, I, I_L i I_C. Iz jednadžbe (50) imamo: $X = |1/[(1/2 \cdot \pi \cdot 10^6 \cdot 10^{-4}) - 4\pi \cdot 10^6 \cdot 10^{-10}]| = |1/(1{,}592 \cdot 10^{-3} - 1{,}257 \cdot 10^{-3})| = 10^3/0{,}335 = 2985\ \Omega$. Ukupnu struju I dobivamo iz jednadžbe (51): $I = U/X = 200/2985 = 0{,}067$ A. Za obje pojedinačne struje imamo (budući da i L i C leže na istom naponu U): $I_L = U/X_L = U/\omega L = 200/2\pi \cdot 10^6 \cdot 10^{-4} = 1/\pi = 0{,}318$ A, a $I_C = U/X_C = U \cdot \omega C = 200 \cdot 4\pi \cdot 10^6 \cdot 10^{-10} = 0{,}08\pi = 0{,}251$ A. Svaka pojedinačna struja je, kako vidimo, veća od ukupne struje! Pokus s jednadžbom potvrđuje istinitost rezultata: $I = |(0{,}318 - 0{,}251)| = 0{,}067$ A.

Ponavljanje

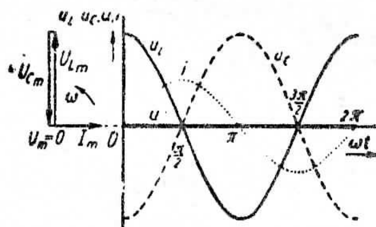
Kod *paralelnog spoja radnog i praznog* otpora momentane vrijednosti pojedinih struja smiju se zbrajati algebarski, dok se efektivne, odnosno tjemene vrijednosti, moraju zbrajati geometrijski. Ukupna struja, koja teče kroz paralelni spoj induktiviteta L i kapaciteta C, jednaka je diferenciji obiju pojedinačnih struja. Ako je struja, koja teče kroz kapacitet, jednaka onoj, koja teče kroz induktivitet, imamo slučaj „paralelne rezonancije", a ukupna struja u tom slučaju jednaka je nuli. Kod paralelnog spoja je *vodljivost* $Y = I/X$ jednaka pozitivnoj diferenciji pojedinih vodljivosti. Za prazni otpor X paralelnog spoja L i C vrijedi: $X = |I/[(I/\omega L) - \omega C]|$. Prema Ohmovom zakonu onda je: $U = I \cdot X$.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kako se kod paralelnog spoja praznih otpora dobiva ukupna struja, ako su poznate pojedinačne struje? *Odgovor: Momentana* vrijednost ukupne struje jednaka je *algebarskoj* sumi, a *tjemena*, odnosno *efektivna* vrijednost, *geometrijskoj* sumi pojedinačnih struja, odnosno pozitivnoj algebarskoj diferenciji pojedinačnih efektivnih ili tjemenih vrijednosti. — *P.*: Na što podsjeća ova činjenica? *O.*: Na algebarsko, odnosno geometrijsko zbrajanje napona kod serijskog spoja. — *P.*: Što je kod struja naročito napadno? *O.*: Da pojedinačne struje mogu biti mnogo veće od ukupne struje. — *P.*: Kakav naročiti slučaj ovdje imamo? *O.*: Ako je struja, koja teče kroz kapacitet, jednaka struji, koja teče kroz induktivitet, nastupa „paralelna rezonancija", a ukupna struja jednaka je nuli.

Serijska rezonancija

92. — Sada ćemo se vratiti na već spomenuti slučaj serijskog spoja induktiviteta i kapaciteta (sl. 61). Najprije ćemo uzeti da niti L niti C nema radnog otpora. Iz odsjeka 79. znademo već, da će kod serijske rezonancije, to jest onda, kad je napon na induktivitetu U_L jednak naponu na kapacitetu U_C, ukupni napon na priključnicama biti $U = 0$. U tom slučaju i momentana vrijednost napona na induktivitetu u_L mora biti jednaka momentanoj vrijednosti napona u_C (sl. 70). Zbrojimo li grafički sinusoide, koje prikazuju oba napona, dobivamo u svakom momentu za u vrijednost 0. Dosljedno tome i na vektorskom prikazu bit će za $U_{Lm} = U_{Cm}$ ukupni napon $U_m = 0$. Ovaj slučaj nastupa uvijek, kad je induktivni prazni otpor $X_L = \omega L$ jednak kapacitivnom praznom otporu $X_C = I/\omega C$, jer kroz oba otpora protječe ista struja.



Sl. 70.

Potrebno je samo kod zadane **kružne** frekvencije ω odabrati odgovarajuće vrijednosti za L i C. Ako međutim imamo zadano L i C, možemo izabrati takvu frekvenciju, da bude $\omega L = 1/\omega C$. Slučaj, koji tada nastupa, nazivamo *serijskom rezonancijom*. Frekvencija, kod koje rezonancija nastupa, naziva se *rezonantnom frekvencijom* ili *vlastitom frekvencijom* titrajnog kruga. Kao uvjet za rezonanciju imamo dakle: $\omega L = 1/\omega C$, ili (ako sa ω_0 označimo rezonantnu kružnu frekvenciju):

$$\boxed{\omega_0^2 \cdot L \cdot C = 1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (52)$$

Riješimo li ovu jednadžbu po ω_0, dobivamo *Thomsonovu jednadžbu*:

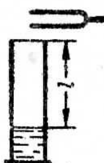
$$\boxed{\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (53)$$

Sa $\omega_0 = 2\pi f_0$ dobivamo za *rezonantnu ili vlastitu frekvenciju* f_0:

$$\boxed{f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C}}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (54)$$

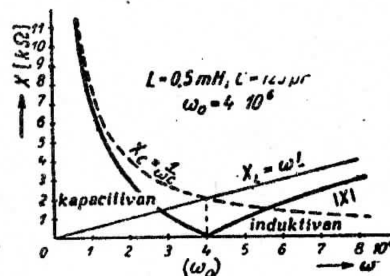
Thomsonova formula je *jedna od najvažnijih osnovnih formula čitave radiotehnike*. Na njoj se bazira proračun titrajnih krugova, filtera, i t. d. Da dobijemo ω_0 u [1/s] i f_0 u [Hz], moramo uvrstiti L u [H], a C u [F].

93. — Potrebno je posebno naglasiti, da pojedinačni naponi na induktivitetu odnosno kapacitetu, mogu kod serijske resonancije poprimiti vrlo velike vrijednosti, usprkos tome, što je napon, na koji je ovaj spoj priključen, jednak nuli (vidi odsjek 79). Serijska rezonancija može se prema onome što smo već rekli, uz danu frekvenciju postići samo s točno određenim induktivitetom i kapacitetom. Krug se mora, kako se to u radiotehnici kaže, promjenom induktiviteta ili kapaciteta *ugoditi* na vlastitu frekvenciju f_0. Ovo „ugađanje" može se usporediti s poznatim pokusom iz akustike: Držimo li glazbenu viljušku, koja daje ton, iznad staklenog cilindra djelomično napunjenog tekućinom, kod određene duljine l (sl. 71) zračnog stupca u cilindru nastupit će znatno pojačanje tona. Ovo pojačanje nastupa uvijek, kad zračni stupac iznad tekućine ima vlastitu frekvenciju jednaku frekvenciji glazbene viljuške, dakle onda kad je viljuška u rezonanciji sa stupcem zraka. Nadolijevanjem tekućine u cilindar ugađamo zračni stupac na odgovarajuću frekvenciju. Otpor serijskog spoja X_0 obaju praznih otpora X_L i X_C je u slučaju rezonancije prema jednadžbi (42): $X_0 = [(X_L - X_C)] = 0$. Serijski spoj induktiviteta i kapaciteta djeluje u tom slučaju kao *kratki spoj*. Ovakvi krugovi upotrebljavaju se često kod prijemnika, kad se želi isključiti lokalna stanica, koja smeta kod prijema neke udaljene stanice (vidi odsjek 210).

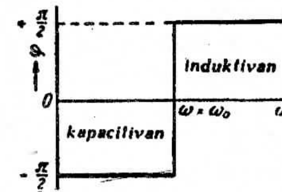


Sl. 71.

94. — Da nađemo ovisnost otpora X o kružnoj frekvenciji, nacrtajmo otpore $X_L = \omega L$ i $X_C = 1/\omega C$ u ovisnosti o kružnoj frekvenciji (sl. 72)! X_L raste s ω, dok X_C s porastom ω pada. Geometrijskim odbijanjem vrijednosti za X_L i X_C dobivamo traženu ovisnost ukupnog otpora: $X = |(X_L - X_C)|$. Iz sl. 72. vidimo, da je X za malene vrijednosti ω vrlo veliko i da se približava vrijednosti za X_C. U slučaju rezonancije, dakle za $\omega = \omega_0$ je $X = X_0 = 0$. Za ω veće od ω_0 X neprestano pada i približava se vrijednpsti $X_L = \omega L$. Kako dalje vidimo iz sl. 72. otpor X je za frekvencije *niže* od rezonantne *kapacitivan*, jer su u tom području vrijednosti za X_C stalno veće od vrijednosti za X_L, pa je prema tome i U_C veće od U_L. *Iznad* rezonantne frekvencije imamo obrnut slučaj, pa je tu serijski spoj *induktivan*. Iz toga slijedi da je fazni kut između napona na priključnicama i struje za prvo područje ($\omega < \omega_0$) jednak $-\pi/2$, odnosno -90^0, a za drugo područje ($\omega > \omega_0$) $+\pi/2$. odnosno $+90^0$. U momentu rezonancije ne možemo više govoriti o faznom pomaku, jer je tada $U = 0$. *U slučaju rezonancije imamo dakle „fazni skok" od π, odnosno 180^0*. Promjene faznih odnosa prikazane su na sl. 73.



Sl. 72.



Sl. 73.

95. — P r i m j e r: Zavojnica s induktivitetom 0,1 mH spojena je u seriju s promjenljivim kondenzatorom maksimalnog kapaciteta 550 pF. Na koliku vrijednost moramo dovesti promjenljivi kondenzator, da krug ugodimo na frekvenciju od 841 kHz? R j e š e n j e: Zadano je $L = 0{,}1$ mH $= 10^{-4}$ H, $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi \cdot 841 \cdot 10^3 = 5{,}28 \cdot 10^6$, a traži se C. Iz jednadžbe (52) imamo: $C = 1/\omega_0^2 \cdot L = 1/27{,}88 \cdot 10^{12} \cdot 10^{-4} = 1/0{,}2788 \cdot 10^{10} = 3{,}59 \cdot 10^{-10}$ F $= 3{,}59 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{12}$ pF $=$ *359 pF*.

Ponavljanje

Ako kod serijskog spoja induktiviteta L i kapaciteta C imamo induktivni otpor jednak kapacitivnome, tada su naponi na oba otpora jednaki, a ukupni napon je jednak nuli. Kružna frekvencija ω_0, uz koju nastupa ova *serijska rezonancija*, može se izračunati iz *Thomsonove* jednadžbe: $\omega_0 = 1/\sqrt{L \cdot C}$, gdje je L induktivitet u [H], a C kapacitet u [F]. Serijski spoj L i C može se odgovarajućim izborom vrijednosti za L i C *ugoditi na rezonantnu frekvenciju* ω_0. U slučaju serijske rezonancije ukupni otpor spoja jednak je nuli. Za frekvencije niže od rezonantne djeluje spoj kapacitivno, a za više frekvencije induktivno. Za $\omega = \omega_0$, odnosno $f = f_0$, imamo *fazni skok* od 180^0.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Što se razumijeva pod rezonancijom serijskog spoja induktiviteta i kapaciteta? *Odgovor*: Pojavu da kod izjednačenja kapacitivnog i induktivnog otpora ovog spoja na pojedinim djelomičnim otporima imamo jednako velike i protivne napone, koji se međusobno poništavaju. — *P*.: Kako se može izračunati frekvencija, kod koje to nastupa? *O*.: Po Thomsonovoj formuli: $f_0 = 1/2\pi \sqrt{L \cdot C}$. — *P*.: Što je kod rezonancije ove vrste naročito značajno? *O*.: Da pojedinačni naponi mogu biti vrlo veliki, uprkos činjenici, da je napon na priključnicama spoja jednak nuli. — *P*.: Koliki je ukupni otpor spoja kod serijske rezonancije? *O*.: Jednak je nuli u slučaju, da u krugu nema radnog otpora. — *P*.: Što se može reći o faznim prilikama? *O*.: Kod frekvencija iznad rezonante frekvencije djeluje spoj induktivno, a kod frekvencija nižih od rezonantne kapacitivno. U prvom slučaju je fazni kut pozitivan, a u drugom negativan, pa kod $\omega = \omega_0$, odnosno $f = f_0$ imamo fazni skok od 180°.

Ponavljanje

31. Kolika je ukupna vrijednost kod paralelnog spoja induktiviteta i kapaciteta?

32. Kakva je praktična vrijednost Thomsonove jednadžbe?

33. Što razumijevamo pod „ugađanjem" serijskog spoja induktiviteta i kapaciteta na određenu frekvenciju?

Zadaci

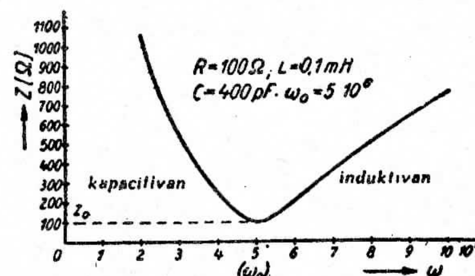
28. Na koliki izmjenični napon frekvencije 50 Hz moramo priključiti paralelni spoj induktiviteta 50 H i kapaciteta 0,1 μF, ako želimo imati ukupnu struju 3 mA, i kolike su u tom slučaju obje pojedinačne struje?

29. Kolika je rezonantna frekvencija serijskog induktiviteta 0,2 mH i kapaciteta 200 pF?

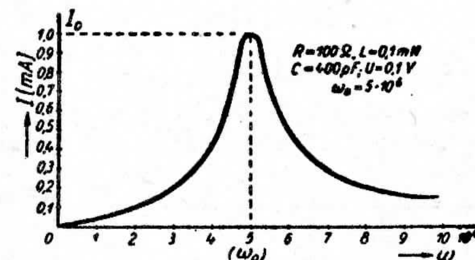
30. Serijski spoj nekog induktiviteta, i kapaciteta 10000 pF, mora se ugoditi na kružnu frekvenciju 5000. Koliki mora biti induktivitet?

96. — Sada možemo promatrati i slučaj, kad u serijskom spoju induktiviteta i kapaciteta imamo i radni otpor R (sl. 64). Ustvari će se R u većini slučajeva sastojati od radnog otpora zavojnice (gubici ili otpor prigušenja). Prikladnim izborom veličina L i C dade se i ovdje postići, da za određenu kružnu frekvenciju ω_0 napon na induktivitetu bude jednak naponu na kapacitetu, dakle $U_L = U_C$. ω_0 se i ovdje zove *rezonantna kružna frekvencija*. U ovom slučaju nastupa opet serijska rezonancija, pa vrijede jednadžbe (52), (53) i (54). Prividni otpor Z serijskog spoja R, L i C za slučaj $\omega_0 L = 1/\omega_0 C$ nije sada više jednak nuli, nego prema jednadžbi (45): $Z = Z_0 = \sqrt{R^2 + 0^2}$, to jest $Z_0 = R$, dakle *radnom otporu*. Osim toga će u slučaju rezonancije prema jednadžbi (47) biti: $tg\, \varphi_0 = 0/R = 0$, to jest $\varphi_0 = 0$. To uostalom i mora biti tako, jer kod čistog radnog otpora struja i napon uvijek su u fazi. Zbog toga sada ne ćemo više imati ni faznog skoka, jer kut faznog pomaka prolazi bez prekida kroz vrijednost nula. Konačno dobivamo da je ukupni napon U zbog toga, što je $U_L = U_C$, iz jednadžbe (44): $U = \sqrt{U_R^2 + 0^2} = U_R$.

97. — *Najmanja* impedancija serijskog spoja R, L i C je dakle $Z_0 = R$. Za frekvencije, koje su iznad i ispod rezonantne frekvencije, Z je uvijek veće od R. *Najveća moguća* jakost struje za slučaj serijskog spoja je $I_0 = U/R$, a postizava se za $\omega = \omega_0$. Na sl. 74. vidimo ovisnost impedancije Z o kružnoj frekvenciji. Odmah upada u oči, da za razliku od slučaja, kada je $R = 0$, krivulja koja pokazuje Z, nikad ne dodiruje horizontalnu os, to jest nikada ne poprima vrijednost nula. Izračunamo li prema Ohmovom zakonu za svaki Z odgovarajuću vrijednost za I, dakle $I = U/Z$, dobivamo vrijednosti, iz kojih možemo nacrtati krivulju ovisnosti jakosti struje I o kružnoj frekvenciji ω (sl. 75). Vidimo, kako smo mogli i očekivati, da jakost struje postizava u momentu rezonancije najvišu vrijednost I_0. Krivulja, koju pokazuje sl. 75., naziva se *krivuljom rezonancije*. Krivulje prikazane sl. 74 i 75. izračunane su za slučaj da je $R = 100\ \Omega$, $L = 0{,}1$ mH, $C = 400$ pF, $U = 0{,}1$ V, a $\omega_0 = 5 \cdot 10^6$.



Sl. 74.

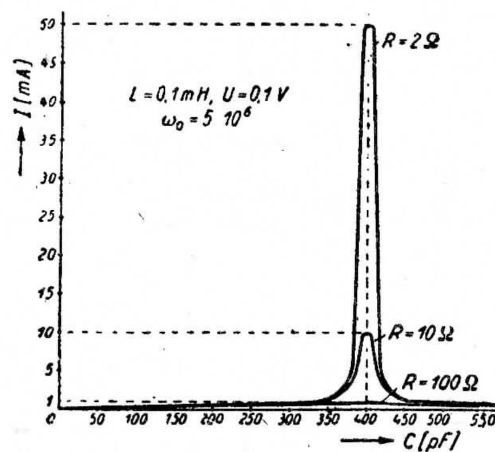


Sl. 75.

98. — Što se kružna frekvencija ω više približava rezonantnoj kružnoj frekvenciji ω_0, to djelomični naponi U_L i U_C postaju veći, dok konačno za $\omega = \omega_0$ ne postane $U_L = U_C$. Iz ove činjenice možemo donijeti važan zaključak: *„Oštrina rezonancije pokazuje, koliko puta je u slučaju serijske rezonancije napon na induktivitetu ili kapacitetu veći od ukupnog napona na serijskom spoju"*. Prema ovome imamo $\rho = U_L / U = I_0 \cdot \omega_0 L / I_0 \cdot R = \omega_0 L / R$ ili $\rho = U_C / U = I_0 / I_0 \cdot \omega_0 C \cdot R = 1/\omega_0 C \cdot R$. Uvrstivši vijednosti iz jednadžbe (53) dobivamo: $\rho = \omega_0 L / R = L/(R \cdot \sqrt{L \cdot C}) = \sqrt{L/(R^2 \cdot C)}$ dakle:

$$\text{(za serijsku rezonanciju)} \quad \boxed{\rho = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C \cdot R} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad \ldots (55)$$

99. P r i m j e r: Zavojnica s induktivitetom 0,1 mH vezana je u seriju s promjenljivim kondenzatorom maksimalnog kapaciteta 550 pF.



Sl. 76.

Radni otpor zavojnice neka bude 2 Ω, 10 Ω, odnosno 100 Ω. Ovaj krug spojen je u antenu prijemnika, koja u slučaju rezonancije s jednim odašiljačem, koji radi na frekvenciji 796 kHz, daje krugu napon 0,1 V. Potrebno je nacrtati krivulju, koja prikazuje ovisnost visokofrekventne struje, koja teče kroz krug, o kapacitetu promjenljivog kondenzatora, dakle krivulju rezonancije. R j e š e n j e: Zadano je $L = 0{,}1\ \text{mH} = 10^{-4}\ \text{H}$, $R = 2, 10, 100\ \Omega$, $\omega = 2\pi f_0 = 2\pi \cdot 7{,}96 \cdot 10^5 = 5 \cdot 10^6$, $U = 0{,}1$ V, a traži se I. Imamo: $\omega L = 5 \cdot 10^6 \cdot 10^{-4} = 500\ \Omega$. Računamo li sa C u [pF], imamo: $1/\omega C = 1/5 \cdot 10^6 \cdot C \cdot 10^{-12} = 10^6/5 \cdot C$. Iz općeg Ohmovog zakona (jednadžba 48) imamo jakost struje I u [mA], ako obje strane jednadžbe pomnožimo sa 1 000: $I\ [\text{mA}] = 1000 \cdot U/Z = 100/\sqrt{R^2 + [500 - (10^6/5C)]^2}$ Uvrstimo li ovdje vrijednosti za R, za razne vrijednosti C dobivamo priloženu tablicu. Na sl. 76. imamo ove vrijednosti prikazane grafički. Odmah primjećujemo, da struja postiže maksimalnu vrijednost za $C = 400$ pF, što znači, da za tu vrijednost mora nastupiti rezonancija. Uvrstimo li vrijednosti $L = 10^{-4}$ H i $C = 400\ \text{pF} = 4 \cdot 10^{-10}$ F u jednadžbi (53), dobivamo $\omega_0 = 1/\sqrt{10^{-4} \cdot 4 \cdot 10^{-10}} = 1/\sqrt{4 \cdot 10^{-14}} = 10^7/2 = 5 \cdot 10^6$, dakle doista frekvenciju odašiljača. *Za oštrinu rezonancije* ρ dobivamo s $R = 2\ \Omega$ iz jednadžbe (55): $\rho = \omega_0 L/R = 5 \cdot 10^6 \cdot 10^{-4}/2 = 250$, odnosno za $R = 10\ \Omega$: $\rho = 50$, za $R = 100\ \Omega$: $\rho = 5$. U slučaju serijske rezonancije je dakle napon na induktivitetu, odnosno kapacitetu, 250, 50, odnosno 5 puta veći od ukupnog napona. Budući da je ukupni napon 0,1 V, to je $U_L = U_C = 25$ V, 5 V, odnosno 0,5 V.

C [pF]	$R = 2\ \Omega$ I [mA]	$R = 10\ \Omega$ I [mA]	$R = 100\ \Omega$ I [mA]
200	0,20	0,20	0,20
300	0,60	0,60	0,51
330	0,94	0,94	0,69
360	1,78	1,77	0,87
380	3,79	3,56	0,97
400	*50*	*10*	*1*
420	4,18	3,88	0,97
440	2,19	1,46	0,91
470	1,33	1,33	0,80
500	0,95	0,95	0,17

100. — Primjer, koji smo sada izračunali, uvodi nas u *teoriju ugađanja titrajnog kruga.* Iz sl. 76. vidimo, da u slučaju rezonancije kod *malenog* radnog otpora struja *vrlo naglo* raste prema maksimalnoj vrijednosti (krivulje za $R = 2$, Ω i 10 Ω). Kod *većeg* radnog otpora, dakle kod zavojnica s velikim gubicima, struja raste *mnogo sporije.* U slučaju da su gubici vrlo veliki, porast struje u slučaju rezonancije je jedva primjetan. Što je strmija

krivulja rezonancije, to će krug oštrije ulaziti u rezonanciju. Ova pojava je od vrlo velikog značenja za takozvanu *oštrinu biranja* ili *selektivnost* titrajnog kruga. Što je naime manji radni otpor, to će veća biti selektivnost, a to u našem primjeru znači, da će se titraji raznih frekvencija, koji na antenu dolaze, to oštrije međusobno moći odijeliti. Ovo nekoliko nabačenih riječi o selektivnosti neka za sada bude dosta; u odsjeku 205. osvrnut ćemo se na ovaj pojam opširnije.

Ponavljanje

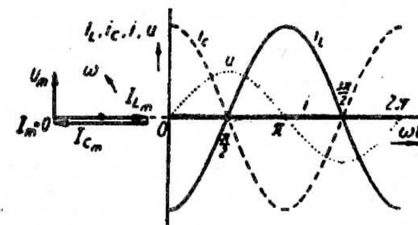
Impedancija Z serijskog spoja radnog otpora, induktiviteta i kapaciteta u slučaju rezonancije jednaka je *radnom otporu* ($Z_0 = R$). Ukupni napon na krugu jednak je tada naponu na radnom otporu ($U = U_R$), i zato je u fazi sa strujom. U slučaju rezonancije ($\omega = \omega_0$) struja postizava svoju maksimalnu vrijednost. *Oštrina rezonancije* ρ pokazuje, koliko je puta napon na induktivitetu, odnosno kapacitetu, u slučaju serijske rezonancije, veći od napona na spoju *R, L, C. Krivulja rezonancije* prikazuje ovisnost struje o frekvenciji. Što je manji radni otpor titrajnog kruga, to je strmija krivulja rezonancije i to veća selektivnost titrajnog kruga.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kolika je impedancija u slučaju rezonancije serijskog spoja radnog otpora, induktiviteta i kapaciteta? *Odgovor*: Jednaka je radnom otporu. — *P.*: Koliki su u ovom slučaju pojedini naponi? *O.*: Ukupni napon U jednak je padu napona na radnom otporu U_R, dok je napon na induktivitetu jednak naponu na kapacitetu, dakle $U_L = U_C$. — *P.*: Što nam pokazuje krivulja rezonancije? *O*: Ovisnost jakosti struje o frekvenciji. — *P.*: Kako se mijenja krivulja rezonancije za razne radne otpore? *O.*: Kod malenih radnih otpora krivulja rezonancije je vrlo strma, dok kod većih postaje položitija. — *P.*: Kako se može izračunati oštrina rezonancije? *O.*: Po formuli: $\rho = U_L/U = U_C/U = \omega_0 L/R = 1/\omega_0 C \cdot R = \sqrt{L/C}/R$.

Paralelna rezonancija

101. — U odsjecima 87. do 91. upoznali smo se s p a r a l e l n i m s p o j e m induktiviteta L i kapaciteta C, i pri tome smo vidjeli, da u ovom slučaju za struju vrijede ista pravila, koja vrijede za napon kod seriskog spoja. Dalje znademo, da je kod stanovite vrijednosti L i C induktivna struja jednaka kapacitivnoj, da je dakle $I_L = I_C$, te je u tom slučaju ukupna struja $I = 0$. Kažemo, da tada imamo *paralelnu rezonanciju.* Na sl. 77. imamo nacrtane krivulje i vektore za slučaj paralelne rezonancije. Budući da je u svakom momentu $i_L = i_C$, momentana vrijednost ukupne struje i bit će jednaka nuli. U vektorskom prikazu je $I_{Lm} = I_{Cm}$, pa je $I = 0$. Isto tako je i efektivna vrijednost $I = 0$. U slučaju paralelne rezonancije obje pojedinačne struje mogu dakle poprimiti vrlo velike vrijednosti,

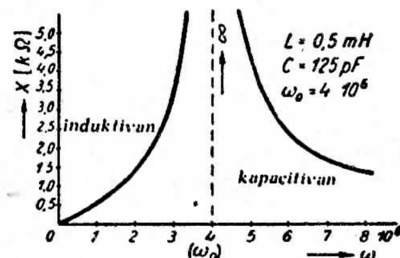


Sl. 77.

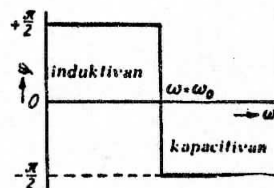
iako je ukupna struja jednaka nuli. Dalje smo vidjeli iz jednadžbe (51) da je: $I_0 = U \mid [(1/\omega_0 L) - \omega_0 C] \mid = 0$. To je međutim moguće samo onda, ako je $1/\omega_0 L = \omega_0 C$. To dalje znači, da mora biti $\omega_0^2 \cdot L \cdot C = 1$ odnosno $\omega_0 = 1/\sqrt{L \cdot C}$. Vidimo dakle, da jednadžbe iz odsjeka 92., a naročito *Thomsonova jednadžba*, vrijede također kao uvjeti i za rezonanciju *paralelnog* spoja induktiviteta i kapaciteta.

102. — Kod paralelne rezonancije vrlo je poučno i važno pobliže promotriti ovisnost praznog otpora X paralelnog spoja L i C o kružnoj frekvenciji ω. Kao prvo dobivamo iz jednadžbe (50) za slučaj paralelne rezonancije: $X_0 = 1/0 = \infty$. Paralelni spoj induktiviteta i kapaciteta, kod kojih nema gubitaka predstavlja u slučaju rezonancije beskonačno veliki otpor, kroz koji uopće ne teče struja. Dok smo krug sa serijskim spojem induktiviteta i kapaciteja u slučaju rezonancije mogli nazvati kratkim spojem, paralelni spoj predstavlja u slučaju rezonancije z a p o r n i k r u g. I ovakav zaporni krug služi kod radioprijemnika za izdvajanje stanica koje smetaju. Za frekvencije niže od rezonantne ($\omega < \omega_0$) imamo u jednadžbi (50): $1/\omega L > \omega C$, pa i X s padom frekvencije pada. Zbog toga, što je ωL manje od $1/\omega C$, biti će i I_L veće od I_C, što znači, da će krug djelovati induktivno. Za frekvencije iznad rezonantne bit će ωC veće od $1/\omega L$, pa će X padati s porastom frekvencije. Sada će također biti i I_C veće od I_L, pa će krug djelovati kapacitivno. Na sl. 78 imamo točan tok krivulje praznog otpora X paralelnog spoja L i C izračunan po jednadžbi (50). Naročito je napadno, da je tok krivulje bitno različit od toka krivulje za serijski spoj (sl. 72).

103. — I kod paralelne rezonancije govorimo o ugađanju spoja na rezonantnu ili vlastitu frekvenciju. Za frekvencije veće od rezonantne kut faznog pomaka je negativan ($\varphi = -\pi/2$), jer krug tada djeluje kapacitivno. Za frekvencije ispod rezonantne fazni kut je zbog induktivnog djelovanja kruga pozi-



Sl. 78.



Sl. 79.

tivan ($\varphi = +\pi/2$). U slučaju rezonancije ($\omega = \omega_0$) imamo dakle i ovdje fazni skok od π ili 180° (vidi sl. 73). Za $\omega = \omega_0$ je $I_0 = 0$, te o nekom određenom faznom kutu ne možemo govoriti.

104. — P r i m j e r: Koliki je otpor paralelnog spoja induktiviteta 0,5 mH i kapaciteta 125 pF za kružnu frekvenciju $2 \cdot 10^6$ i $6 \cdot 10^6$, i koja je rezonantna frekvencija? R j e š e n j e: Zadano je $L = 0{,}5\,mH = 5 \cdot 10^{-4}$ H, $C = 125\,pF = 1{,}25 \cdot 10^{-10}$ F, $\omega = 2 \cdot 10^6$, odnosno $6 \cdot 10^6$, traži se X i ω_0.

Da nađemo X upotrijebit ćemo jednadžbu (50) uvrstivši $1/\omega L = 1/2 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-4}$, odnosno $1/6 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 10^{-3}$, odnosno $0{,}33 \cdot 10^{-3}$ i $\omega C = 2 \cdot 10^6 \cdot 1{,}25 \cdot 10^{-10}$, odnosno $6 \cdot 10^6 \cdot 1{,}25 \cdot 10^{-10} = 0{,}25 \cdot 10^{-3}$, odnosno $0{,}75 \cdot 10^{-3}$. Tada je $X = \mid 1/0{,}75 \cdot 10^{-3} \mid$, odnosno $\mid 1/-0{,}42 \cdot 10^{-3} \mid = 1{,}33$ kΩ, odnosno 2,38 kΩ. Za ω_0 dobivamo prema odsjeku 101.: $\omega_0 = 1/\sqrt{L \cdot C} = 1/\sqrt{6{,}25 \cdot 10^{-14}} = 4 \cdot 10^6$ [1/s].

Ponavljanje

Kod paralelnog spoja induktiviteta L i kapaciteta C nastupa kod kružne frekvencije određene *Thomsonovom* jednadžbom $\omega_0 = 1/\sqrt{L \cdot C}$ paralelna rezonancija. U ovom slučaju su obje pojedinačne struje jednake i protivnog smjera te se poništavaju; ukupna struja jednaka je nuli, a otpor kruga je beskonačno velik. U slučaju *paralelne rezonancije* spoj djeluje kao *zaporni krug*. Za frekvencije *niže* od rezonantne ponaša se krug *induktivno*, a za *više* frekvencije *kapacitivno*. Kao i kod serijske rezonancije, tako i kod paralelne rezonancije dolazi do *faznog skoka* od π ili 180°.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Što razumijevamo pod rezonancijom paralelnog spoja induktiviteta i kapaciteta? *Odgovor:* Pojavu da se zbog toga, što je induktivni otpor jednak kapacitivnom, obje struje koje teku kroz ove otpore, poništavaju, jer su jednake. — *P.*: Kod koje frekvencije do ovoga dolazi? *O.*: Kod rezonantne frekvencije određene Thomsonovom formulom $f_0 = 1/2\pi\sqrt{L \cdot C}$. — *P.*: Kakvu važnu osebinu ima paralelni spoj induktiviteta i kapaciteta bez gubitaka u slučaju rezonancije? *O.*: On predstavlja beskonačno veliki otpor, zbog čega je dobio ime „zaporni krug". — *P.*: Kakve fazne odnose imamo kod paralelne rezonancije? *O.*: U slučaju rezonancije imamo fazni skok od π ili 180°. — *P.*: Kako se ovakav krug ponaša kod ostalih frekvencija? *O.*: Za frekvencije niže od rezonantnih krug djeluje induktivno, a za više kapacitivno.

Pitanja

34. Kakva je razlika između serijske i paralelne rezonancije?

35. Kakva je ovisnost kod serijske rezonancije između oštrine rezonancije i tangensa kuta gubitaka zavojnice?

36. Ukoliko paralelni spoj induktiviteta i kapaciteta u slučaju rezonancije djeluje kao zaporni krug?

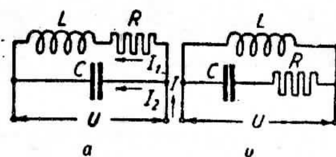
Zadaci

31. Serijski spoj induktiviteta i kapaciteta mora biti ugođen na frekvenciju 191 kHz; a) koliki mora biti induktivitet, ako je kapacitet kondenzatora 300 pF, b) koliki će biti prividni otpor u slučaju rezonancije, ako zavojnica ima radni otpor 3 Ω, c) kolika je oštrina rezonancije?

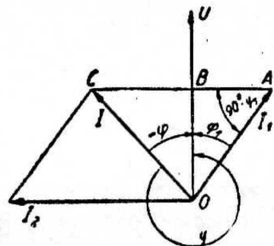
32. Zavojnica s induktivitetom 5 H i radnim otporom 500 Ω spojena je u seriju s kondenzatorom kapaciteta 2 µF, a čitav spoj je priključen na napon 100 V; a) kolika je rezonantna frekvencija, b) koliki je otpor kod rezonantne frekvencije, c) kolika je jakost struje kod rezonancije, d) koliki su u slučaju rezonancije pojedini naponi?

33. Koliki kapacitet moramo priključiti paralelno induktivitetu bez gubitaka od 10 mH, da kod frekvencije 1 kHz nastupi rezonancija, i koliki će biti otpor kruga u slučaju rezonancije?

105. — Budući da paralelni spoj induktiviteta i kapaciteta ima kod gradnje prijemnika i odašiljača vrlo veliku važnost, upoznat ćemo se s njime još detaljnije. Razmatranje, koje slijedi, bit će korisna vježba i produbljivanje dosadašnjeg znanja o izmjeničnoj struji. U prvom redu moramo ispitati, kako u paralelnom spoju djeluje radni otpor, koji uvijek imamo, jer u praksi nikada nema zavojnice ni kondenzatora bez gubitaka. U većini slučajeva potrebno je uzeti u obzir samo radni otpor R induktiviteta L, jer moderni kondenzatori (iznimka su elektrolitski kondenzatori), kad se usporede sa zavojnicama, imaju vrlo malene gubitke. Za ovaj slučaj imamo spoj kao na sl. 80-a). Ukupna struja I je prema odsjeku 87 jednaka geometrijskoj sumi djelomičnih struja I_1 i I_2. Struja I_1, koja teče kroz R i L, zaostaje iza napona U za kut φ_1, dok struja I_2, koja teče kroz granu kapaciteta, prethodi naponu U za 90^0. Vektorski prikaz na sl 81 pokazuje, na koji način je ukupna struja I sastavljena od pojedinačnih struja.



Sl. 80.



Sl. 81.

106. — Prema kosinusovom poučku iz trigonometrije vrijedi za trokut OAC; $I^2 = I_1^2 + I_2^2 - 2 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos(90^0 - \varphi_1)$ ili, budući da je $\cos(90^0 - \varphi_1) = \sin \varphi_1 = \omega L / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$; $I^2 = I_1^2 + I_2^2 - 2 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \omega L / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$. Budući da obje paralelne grane leže na istom naponu U, bit će prema Ohmovom zakonu $U^2/Z^2 = (U^2/[R^2 + (\omega L)^2]) + U^2 (\omega C)^2 - 2 \cdot U^2 \cdot \omega^2 \cdot C \cdot L/[R^2 + (\omega L)^2]$ t. j. $1/Z^2 = (1 - 2\omega^2 L\, C/[R^2 + (\omega L)^2]) + (\omega C)^2$. Za slučaj rezonancije je $\omega = \omega_0$; a $\omega_0^2 \cdot L \cdot C = 1$, dakle $(\omega_0 L)^2 = L/C$, a $(\omega_0 C)^2 = C/L$. Uvrstimo li ove vrijednosti, imamo za rezonantni otpor $1/Z_0^2 = [-1/(R^2 + (L/C))] + (C/L)$.

Iza toga nakon sređivanja dobivamo $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}\left(1 + \frac{L}{C \cdot R^2}\right)}$ Budući da je u većini slučajeva C izraženo u [F] vrlo maleno, bit će izraz $L/C \cdot R^2$ mnogo veći od 1, tako da će vrijediti: $[1 + (L/C \cdot R^2)] \approx L/C \cdot R^2$. Na taj način dobivamo za rezonantni otpor $Z_0 \approx \sqrt{L^2/C^2 \cdot R^2}$ ili

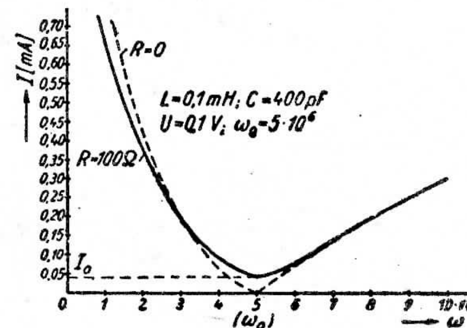
$$Z_0 \approx \frac{L}{C \cdot R} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (56)$$

Prema tome jakost struje u slučaju paralelne rezonancije ne postizava više vrijednost nula, nego vrijednost $I_0 = U/Z_0 \approx U \cdot C \cdot R/L$. *Zaporni krug bit će dakle to bolji, što je njegov radni otpor manji, što je manji kapacitet i što je veći induktivitet.* Induktivitet L ne smijemo međutim uzeti prevelik, jer veliki induktiviteti imaju redovito i veliki radni otpor. Kako matematski izvodi pokazuju, vrijede gornja razlaganja, dakle i jednadžba (56), također i za slučaj, kad radni otpor nije u seriji s induktivitetom, već s kapacitetom (sl. 80-b).

107 — Za fazni kut iz sl. 81 imamo: $tg\, \varphi = -BC/OB$; pri tome znak minus znači, da φ ima vrijednost između 270^0 i 360^0. Iz sl. 81 slijedi: $BC = AC - AB = I_2 - I_1 \cdot \sin \varphi_1$, a $OB = I_1 \cdot \cos \varphi_1$. Dalje je prema sl. 19: $\sin \varphi_1 = \omega L / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, a $\cos \varphi_1 = R/\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$. Osim toga je $I_2 = U \cdot \omega C$, a $I_1 = U/\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$. Iz ovoga imamo: $BC = U \cdot \omega C - [U \cdot \omega L/R^2 + (\omega L)^2]$, a $OB = U \cdot R/[R^2 + (\omega L)^2]$. Sada možemo izračunati $tg\, \varphi$. Za slučaj *rezonancije* imamo prema odsjeku 106: $\omega_0 C = \sqrt{C/L}$, a $(\omega_0 L)^2 = L/C$. Ako ove vrijednosti uvrstimo za BC i OB, imamo nakon sređivanja, u slučaju rezonancije, $tg\, \varphi_0 = -\omega_0 C \cdot R$. Predznak minus pokazuje, da spoj prema slici 80-a u slučaju rezonancije djeluje kapacitivno. Kad bismo isti račun ponovili za spoj prema sl. 80-b, dobili bismo: $tg\, \varphi_0 = +\omega_0 C \cdot R$. Paralelni spoj djelovao bi dakle sada induktivno. Sa $\omega_0 C = 1/\omega_0 L = \sqrt{C/L}$ konačno dobivamo:

$$tg\, \varphi_0 = \mp R \cdot \omega_0 C = \mp \frac{R}{\omega_0 L} = \mp R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad . \quad . \quad (57)$$

108. — Za $R = 0$ imamo u slučaju rezonancije $Z_0 = \infty$, dakle $I_0 = 0$. U slučaju da radni otpor ne možemo zanemariti, postizava struja vrijednost izračunanu u odsjeku 106. Na sl. 82 vidimo dijagram, koji prikazuje ovisnost jakosti struje I o kružnoj frekvenciji ω za $R = 0$ i $R = 100\ \Omega$. I ovdje se primjećuje napadno različit tok krivulje od one na sl. 75.



Sl. 82.

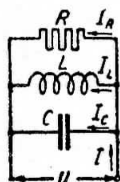
Ponavljanje

Ako kod paralelnog spoja induktiviteta i kapaciteta imamo radni otpor spojen u seriju s L ili s C, ne će impedancija Z_0 paralelnog spoja u slučaju resonancije biti beskonačno velika, nego približno jednaka $L/C \cdot R$. Ovakav krug djeluje dakle to bolje, što su gubici induktiviteta, odnosno kapaciteta manji, Paralelni spoj ponaša se u slučaju rezonancije kapacitivno, ako radni otpor leži u seriji s induktivitetom, a induktivno, ako je taj otpor u seriji s kapacitetom.

Pitanja i odgovori

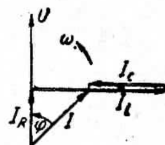
Pitanje: Kolika je impedancija zapornog kruga u slučaju rezonancije, ako u krugu ima gubitaka? *Odgovor*: Približno jednaka $L/C \cdot R$. — *P.*: Što je uvjet, da rezonantni otpor bude što veći? *O.*: Što manji radni otpor, što manji kapacitet i što veći induktivitet. — *P.*: Kolika je jakost struje, koja teče kroz

zaporni krug u slučaju rezonancije? *O.:* Ako zaporni krug nema gubitaka, onda je struja $I_0 = 0$; u stvarnosti će ona biti $I_0 = U/Z \approx U \cdot C \cdot R/L$.



Sl. 83.

109. — Konačno ćemo razmotriti još jedan važan slučaj: kad su *sve tri veličine L, C i R spojene paralelno* (sl. 83). Ukupna struja I dijeli se sada u tri grane: I_R, I_L i I_C. Struja, koja teče kroz radni otpor I_R u fazi je sa zajedničkim naponom U; struja, koja teče kroz induktivitet I_L, zaostaje za naponom U za 90°; struja, koja teče kroz kapacitet I_C, prethodi naponu za 90°. Na sl. 84 imamo vektorski prikaz ovih struja.



Sl. 84.

110. — Iz trokuta na sl. 84. slijedi: $I^2 = I_R^2 + (I_L - I_C)^2$, za slučaj, da je I_L veće od I_C. Iz Ohmovog zakona dobivamo: $U^2/Z^2 = (U^2/R^2) + [(U/\omega L) - U \cdot \omega C]^2$. Sredivši ovo za vodljivost Y ovog paralelnog spoja dobivamo:

$$\boxed{Y = \frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2}} \quad . \quad . \quad (58)$$

Dalje iz sl. 84 imamo za fazni kut: $tg\,\varphi = (I_L - I_C)/I_R = \dfrac{\dfrac{U}{\omega L} - U \cdot \omega C}{U/R}$ dakle

$$\boxed{tg\,\varphi = R \cdot \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)} \quad . \quad . \quad . \quad (59)$$

111. — U slučaju *paralelne* rezonancije je $1/\omega_0 L = \omega_0 C$, što znači prema jednadžbi (58): $1/Z_0 = 1/R$ ili $Z_0 = R$. Na taj način smo došli do istog rezultata, kao i kod serijske rezonancije. To se uostalom dade pokazati i bez računa. U slučaju rezonancije je $X_L = X_C$, a $I_L = I_C$, pa se obje struje, zbog toga što su protivne u fazi, poništavaju, tako da je ukupna struja $I_0 = I_R$. *Paralelni spoj R, L i C djeluje dakle u slučaju rezonancije kao radni otpor veličine R*, a dosljedno tome mora biti i $\varphi_0 = 0$. I ovdje, kao i kod serijske rezonancije možemo govoriti o *oštrini rezonancije: „Oštrina rezonancije ϱ pokazuje, koliko će puta u slučaju paralelne rezonancije jakost struje, koja teče kroz kapacitivnu, odnosno induktivnu granu, biti jača od ukupne struje."* Prema tome je: $\varrho = I_L/I = U \cdot Z_0/U \cdot \omega_0 L = R/\omega_0 L$ ili $\rho = I_C/I = U \cdot \omega_0 C \cdot Z_0/U = \omega_0 C \cdot R$. Imamo dakle za ρ upravo **recipročnu** vrijednost od one u jednadžbi (55), pa za paralelnu rezonanciju možemo reći da je:

(za paralelnu rezonanciju) $$\boxed{\varrho = \frac{R}{\omega_0 L} = \omega_0 C \cdot R = R\sqrt{\frac{C}{L}}} \quad . \quad (60)$$

112. — Primjer: Radni otpor vrijednosti 200 kΩ spojen je paralelno zavojnici 0,1 mH i kondenzatoru kapaciteta 400 pF. Kolika je a) kružna frekvencija za slučaj rezonancije, b) prividni otpor u tom slučaju, c) jakost struje u slučaju rezonancije, ako na tom spoju imamo napon 10 V, d) oštrinu rezonancije? Rješenje: Zadano je $R = 200$ kΩ $= 2 \cdot 10^5$ Ω, $L = 0{,}1$ mH $= 10^{-4}$ H, $C = 400$ pF $= 4 \cdot 10^{-10}$ F, $U = 10$ V, a traži se ω_0, Z_0, I_0 i ϱ. Iz jednadžbe (53) imamo: $\omega_0 = 1/\sqrt{10^{-4} \cdot 4 \cdot 10^{-10}} = \sqrt{10^{14}/4} = 5 \cdot 10^6$ [1/s]. Prema odsjeku 111. prividni otpor je u slučaju rezonancije jednak radnom otporu $Z_0 = R = 200$ kΩ. Iz ovoga dobivamo jakost struje u slučaju rezonancije: $I_0 = U/R = 10/2 \cdot 10^5 = 5 \cdot 10^{-5}$ A $= 0{,}05$ mA. Oštrina rezonancije je, prema jednadžbi (60): $\varrho = R \cdot \sqrt{C/L} = 2 \cdot 10^5 \sqrt{4 \cdot 10^{-10}/10^{-4}} = 2 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{4 \cdot 10^{-6}} = 2 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 400$.

113. — S ovim primjerom završili bismo naše razmatranje o spojevima radnih i praznih otpora. Ako i nismo obradili sve mogućnosti, upoznali smo se s proračunavanjem titrajnih krugova, koji su za radiotehniku najvažniji. Time će nam biti znatno olakšano upoznavanje sa spojevima, koji će doći kasnije. Radi toga preporučamo, da se dosada obrađena poglavlja temeljito nauče.

Ponavljanje

Impedancija paralelnog spoja radnog otpora R, induktiviteta L i kapaciteta C, u slučaju rezonancije jednaka je radnom otporu ($Z_0 = R$). U ovom slučaju poništavaju se obje prazne struje, pa je ukupna struja jednaka struji, koja teče kroz radni otpor ($I_0 = I_R$). Napon na priključnicama i ukupna struja u tom slučaju su dakle u fazi ($\varphi_0 = 0$). *Oštrina rezonancije* pokazuje, koliko su puta u slučaju rezonancije jače struje, koje teku kroz kapacitet odnosno induktivitet, od ukupne struje. Oštrina rezonancije kod paralelnog spoja jednaka je recipročnoj vrijednosti oštrine rezonancije kod serijskog spoja.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Iz čega se najlakše može vidjeti djelovanje paralelnog spoja induktiviteta, kapaciteta i radnog otpora? *Odgovor:* Iz vektorskog prikaza struja. — *P.:* Kad za ovaj spoj nastupa rezonancija? *O.:* Kad je kapacitivni otpor jednak induktivnom. — *P.:* Kolika je impedancija ovakvog paralelnog spoja u slučaju rezonanicje? *O.:* Jednaka je radnom otporu. — *P.:* Što nam pokazuje oštrina rezonancije u ovom slučaju? *O.:* Koliko su puta veće prazne struje od ukupne struje paralelnog spoja.

Pitanja

37. Čime se razlikuje djelovanje zapornog kruga s gubicima od djelovanja zapornog kruga bez gubitaka?

38. Zašto se zaporni krug može upotrijebiti za izlučivanje stanice, koja smeta kod prijema?

39. Kakva veza postoji između oštrine rezonancije kod paralelnog i serijskog spoja?

Zadaci

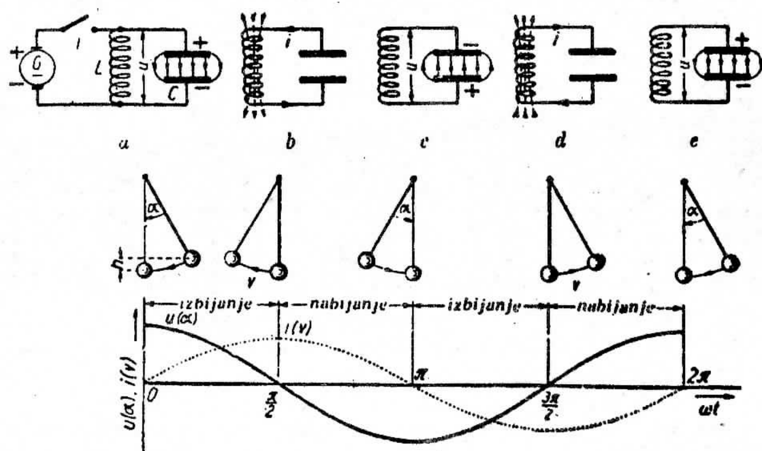
34. Kolika je u slučaju rezonancije impedancija zapornog kruga, koji se sastoji od zavojnice s induktivitetom 0,2 mH i radnim otporom 2 Ω, te kapaciteta od 200 pF, i kolika će biti jakost struje, koja teče kroz ovaj krug, ako od antene dobiva napon 0,1 V?

35. Oštrina rezonancije paralelnog spoja, koji se sastoji od radnog otpora, induktiviteta 0,4 mH i kapaciteta 100 pF, mora biti 200; a) koliki mora biti radni otpor? b) za koju će kružnu frekvenciju nastupiti rezonancija, c) kolika će biti impedancija u slučaju rezonancije?

Titrajni krug

114. — Električki titrajni krug sastoji se, kao što smo već rekli, od zavojnice i kondenzatora. Radni otpor, koji u ovakovom spoju uvijek imamo, još i sada ćemo zanemariti. Odakle dolazi ime „titrajni krug", i što u ovakvom krugu zapravo titra? Da odgovorimo na ovo pitanje uzet ćemo kao polaznu točku paralelnu rezonanciju, o kojoj je već bilo govora u odsjeku 101. Znademo već, da su struje, koje u tom slučaju teku kroz induktivitet L i kapacitet C, međusobno jednake i da se poništavaju. Ukupna struja, koja teče u dovodnim žicama, jednaka je nuli, tako da krug ne uzime energiju iz generatora izmjenične struje G (sl. 67.), iako generator krugu daje napon. Mogli bismo prema tome odmah nakon ukapčanja generator iskopčati. Kad u krugu, kao što smo pretpostavili, ne bi bilo radnog otpora, morale bi obje prazne struje i dalje teći, a energija, koja se nalazi u titrajnom krugu, morala bi se neprestano njihati.

115. — Titrajni krug sastavljen od paralelnog spoja L i C (sl. 85. gore) priključuje se uklopcem T na generator istosmjerne struje G. Uslijed toga nabija se kondenzator C (sl. 85-a), a među njegovim pločama stvara se *električko polje*. Ako sada uklopac T otvorimo, *izbija* se kondenzator C preko

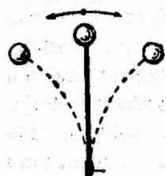


Sl. 85.

zavojnice L, a uslijed struje izbijanja nastaje u zavojnici *magnetsko polje*. Kad je kondenzator posve izbijen, sva njegova energija nalazi se u zavojnici kao magnetska energija (sl. 85.-b). U ovom slučaju je napon u na priključnicama kondenzatora jednak nuli, dok struja i ima maksimalnu vrijednost (sl. 85. dolje). Budući da je, međutim, svako magnetsko polje uvjetovano postojanjem struje, struja i mora i dalje teći. Magnetsko polje zavojnice razgrađuje se pomalo, a zbog p r o m j e n a p o l j a, koje tako nastaju, pojavljuje se napon indukcije. Ovaj napon po poznatom Lenzovom zakonu nastoji spriječiti promjene polja, to jest nastoji da i dalje podržava struju. Uslijed toga, što struja i dalje teče, kondenzator će se nanovo nabijati, sada naravno u protivnom smjeru, jer će elektroni s donjeg obloga kondenzatora odlaziti i dolaziti na gornji oblog. Na taj način se magnetska energija zavojnice pretvorila opet u električnu energiju kondenzatora. Po završetku ovog procesa (sl. 85.-c) napon u na priključnicama kondenzatora postigao je opet svoju najvišu vrijednost, ali sada protivnog smjera, dok je struja i opet pala na nulu (sl. 85. dolje). Poslije toga nastupa ponovo izbijanje kondenzatora preko zavojnice, dakako u protivnom smjeru od onoga u početku. Električna energija kondenzatora pretvara se u magnetsku energiju zavojnice (sl. 85.-d); napon kondenzatora pada na nulu, a struja postizava svoju maksimalnu vrijednost u protivnom smjeru. Struja, koja i dalje sada teče, uzrokuje ponovo nabijanje kondenzatora u istom smjeru, kao i u početku čitavog procesa (sl. 85.-e). Opisana igra ponavlja se nakon toga dalje. Vidimo dakle da naboj kondenzatora u titrajnom krugu neprestano titra, i da imamo trajno pretvaranje električke energije u magnetsku. Za vrijeme izbijanja kondenzator djeluje kao generator, a zavojnica kao potrošač, dok je za vrijeme nabijanja obrnut slučaj. Opisani proces odvijao bi se trajno, kad ne bi, naročito u zavojnici, postojali gubici. Ustvari ovo titranje opada s vremenom na nulu („*prigušeni titraji*"). Ono, što zapravo u titrajnom krugu titra, jest množina elektriciteta, koja se nalazi na oblozima kondenzatora, odnosno e l e k t r o n i struje nabijanja i izbijanja. Sl. 85. dolje može nam poslužiti kao grafički prikaz „*neprigušenog* električkog titranja".

116. — Kako bismo još bolje prikazali proces titranja, poslužit ćemo se opet *usporedbom iz mehanike*, i to njihalom (sl. 85. u sredini). Povučemo li njihalo iz njegova položaja mirovanja za kut α, moramo izvršiti radnju potrebnu za dizanje njihala, jer se je kugla njihala digla sada za visinu h prema gore. Radnja, koju smo na ovo dizanje utrošili, sakupljena je u njihalu kao *energija položaja*. Kod titrajnog kruga odgovara ovoj energiji polje kondenzatora. Pustimo li njihalo, ono će samo po sebi doći u početni položaj mirovanja i postići tu maksimalnu brzinu v, i najveću *energiju gibanja*. Kod titrajnog kruga ovo odgovara magnetskoj energiji polja zavojnice. Njihalo međutim zbog ustrajnosti ide i preko položaja mirovanja, pa se podigne opet za istu visinu h na drugoj strani. Energija gibanja pretvorila se opet u energiju položaja. Kod titrajnog kruga ovo odgovara razaranju magnetskog polja i stvaranju električkog polja. Sada se proces ponavlja u protivnom smjeru. Vidimo dakle, da i kod njihala imamo neprestano pretvaranje jedne vrste energije u drugu. Tromosti njihala odgovara induktivitet zavojnice, kutu α, za koji njihalo pomaknemo, odgovara napon u, a brzini njihala v jakost struje i.

117. — Možemo još kratko napomenuti, da se titrajni krug dade usporediti s *elastičnim perom* ili s cijevi u obliku slova U, u kojoj se *njiše tekućina* (sl. 86. i sl. 87.). Elastično pero njiše se nakon udarca trajno oko svog položaja mirovanja, a pri tome elasticitet pera predstavlja kapacitet, a masa



Sl. 86.



Sl. 87.

kugle na peru induktivitet titrajnog kruga. U drugom primjeru tekućina se nakon prvog impulsa trajno njiše u cijevi oko svog početnog položaja, pa imamo trajno pretvaranje energije položaja u energiju gibanja. Neizbježivo prigušenje uvjetovano trenjem i ovdje dovodi do konačnog prestanka titranja.

118. — Ako otpore gubitaka možemo zanemariti, i ovdje za izračunavanje v l a s t i t e ili r e z o n a n t n e f r e k v e n c i j e vrijedi već prije (vidi jednadžbe 52, 53 i 54) spomenuta i nama dobro poznata T h o m s o n o v a jednadžba. Prema jednadžbi (53) veličina, koja određuje vlastitu frekvenciju, je izraz $\sqrt{L \cdot C}$. Maksimalna efektivna jakost struje u i n d u k t i v i t e t u L ili k a p a c i t e t u C kruga bez gubitaka slijedi iz Ohmovog zakona. Budući da su u slučaju rezonancije obje prazne struje I_L i I_C, a isto tako i oba prazna otpora $\omega_0 L$ i $1/\omega_0 C$, jednako veliki, bit će: $I = U/\omega_0 L = U \cdot \omega_0 C$ ili, budući da je $\omega_0 L = L/\sqrt{L \cdot C} = \sqrt{L/C}$:

$$I = \frac{U}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (61)$$

$\sqrt{L/C}$ naziva se *valnim otporom* titrajnog kruga, jer se u poredbi s Ohmovim zakonom ovaj izraz može smatrati otporom.

Ponavljanje

U titrajnom krugu sastavljenom od kondenzatora i zavojnice imamo nakon prvog nabijanja kondenzatora trajno njihanje naboja kondenzatora. Električna energija kondenzatora pretvara se u magnetsku energiju polja zavojnice i obrnuto. Ova igra ponavlja se neprestano, ukoliko u krugu nema gubitaka. No kako nema titrajnog kruga bez gubitaka, nemamo nikada *neprigušene*, nego uvijek *prigušene titraje*. Proces titranja u titrajnom krugu dade se usporediti s njihanjem njihala. Vlastita ili rezonantna frekvencija titrajnog kruga dobiva se iz *Thomsonove* jednadžbe $f_0 = 1/2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$. Maksimalna efektivna jakost struje u induktivitetu ili kapacitetu titrajnog kruga određena je *valnim otporom* $\sqrt{L/C}$, pa je $I = U/\sqrt{L/C}$.

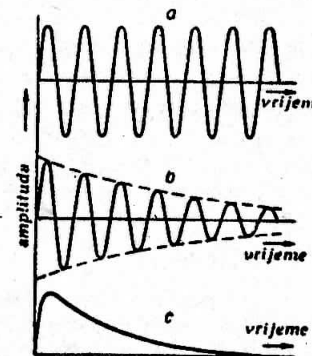
Pitanja i odgovori

Pitanje: Što je titrajni krug? *Odgovor:* Zatvoreni spoj induktiviteta i kapaciteta. — *P.*: Koje prije spomenute pojave dovode do objašnjenja procesa u titrajnom krugu? *O.*: Paralelna, odnosno serijska rezonancija. — *P.*: Kakvu pretvorbu energije imamo u titrajnom krugu? *O.*: Energija električnog polja kondenzatora pretvara se u magnetsku energiju polja u zavojnici i obrnuto. — *P.*: Dešava li se ova pretvorba samo jedamput?

O.: Ne, ona se ponavlja neprekidno i trajala bi beskonačno, kad bi imali krugove bez gubitaka. — *P.*: Zašto uopće možemo govoriti o titranju? *O.*: Zato, što se energija jedamput dovedena u titrajni krug neprestano njiše između kondenzatora i zavojnice, a prema tome neprestano se njiše i naboj kondenzatora. — *P.*: O čemu je ovisna vlastita frekvencija titrajnog kruga? *O.*: O induktivitetu i kapacitetu, i to prema Thomsonovoj jednadžbi. — *P.*: Što razumijevamo pod valnim otporom titrajnog kruga? *O.*: Izraz $\sqrt{L/C}$.

Prigušenje električnih titraja

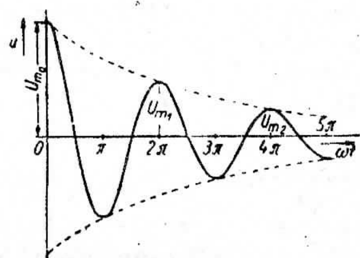
119. — Kad imamo titrajni krug bez gubitaka, u njemu se mogu trajno, sami po sebi podržavati n e p r i g u š e n i t i t r a j i, kojih amplituda ostaje prema tome uvijek jednaka (sl. 88-a). Kako međutim nema titrajnih krugova bez gubitaka, amplituda titraja, pada, već prema veličini otpora gubitaka, dakle prema veličini prigušenja titrajnog kruga, brže ili sporije na vrijednost nula. Mjesto neprigušenih imamo p r i g u š e n e t i t r a j e (sl. 88-b). Ovdje su dakle prilike iste kao i kod njihala, koje zbog otpora zraka i trenja u ležaju naposljetku prestane s njihanjem. Kod vrlo velikih otpora gubitaka amplituda već nakon prve četvrtine periode padne na nulu, pa tada imamo a p e r i o d s k o titranje (sl. 88-c). Ova pojava može se ostvariti i u mehanici ako imamo na primjer njihalo, koje se njiše u gustoj tekućini. Ono će u tom slučaju nakon prvog otklona lagano doći u položaj mirovanja, iz kojega se dalje ne će maknuti.



Sl. 88.

120. — O raznim mogućnostima gubitaka kod zavojnice i kondenzatora to jest o raznim uzrocima prigušenja titraja, govorili smo već u odsjeku 25 i 43. Znademo, da postoje ovi gubici: gubici u dielektrikumu, gubici radi loše izolacije, skin-efekt i isijavanje, te gubici u željezu. Što je viša frekvencija titraja, to su i spomenuti gubici veći. Kako pokazuju točni matematički izvodi, u koje se ovdje ne ćemo upuštati, vlastita frekvencija kruga s gubicima je nešto n i ž a od one kod kruga bez gubitaka. Thomsonova jednadžba tada ne daje više točne rezultate; te je treba nadomjestiti jednadžbom: $\omega_0 = \sqrt{(1/L \cdot C) - (R^2/4 L^2)}$. Ako je međutim — a to je u većini slučajeva — $R^2/4 L^2$ vrlo maleno prema $1/L \cdot C$, to jest R vrlo maleno prema $2 L/\sqrt{L \cdot C}$, ili R vrlo maleno prema $2 \cdot \sqrt{L/C}$, ako je dakle *radni otpor mnogo manji od dvostrukog valnog otpora*, može se drugi član pod kvadratnim korijenom ispustiti, te opet dobivamo Thomsonovu jednadžbu. Za slučaj da je $R = 2 \cdot \sqrt{L/C}$, kvadratni korijen je jednak nuli, a prema tome i $\omega_0 = 0$. To znači, da u titrajnom krugu uopće ne dolazi do titranja, već se kondenzator jednom nabijen a p e r i o d s k i izbije (sl. 88-c). Ako je *R veće od* $2 \cdot \sqrt{L/C}$, bit će kvadratni korijen imaginaran, a titranje će onda opet biti aperiodsko.

121. — Na sl. 89. imamo još jedamput prikazano prigušeno titranje. Kako smo vidjeli u odsjeku 13 i sl. 10. jakost struje u zavojnici pada po eksponencijalnoj krivulji na vrijednost nula. To isto će vrijediti i za tjemene vrijednosti struje, odnosno napona, prigušenog titrajnog kruga. I one će po eksponencijalnom zakonu postajati sve manje. Što je veći radni otpor R, to prije će vrijednost struje i napona pasti na vrijednost nula, to više će biti prigušen titrajni krug. Sl. 89 prikazuje dijagram napona kod prigušenog titranja. Amplitude napona padaju postepeno po crtkanoj eksponencijalnoj krivulji na nulu. Pri tome je omjer dviju susjednih amplituda, to jest dviju susjednih maksimalnih pozitivnih i negativnih vrijednosti napona, uvijek jednak. Ovaj omjer naziva se dekrementom prigušenja d. Prema tome je $d = U_{m_0}/U_{m_1} = U_{m_1}/U_{m_2} = \ldots$ Prikladnije je međutim kao mjerilo za prigušenje mjesto dekrementa d uzeti njegov prirodni logaritam $ln\ d$. $ln\ d$ se naziva logaritmičkim dekrementom prigušenja ϑ.



Sl. 89.

Ponavljanje

Neprigušene titraje, dakle titraje stalne amplitude, možemo imati samo u titrajnim krugovima bez gubitaka. Kako se u stvarnosti gubici ne mogu izbjeći, to su svi titraji *prigušeni*, što znači da im amplitude po eksponencijalnom zakonu postepeno padaju na nulu. U krugovima s vrlo velikim gubicima možemo imati samo *aperiodske titraje*, to jest titraje, koji prestaju već nakon prve četvrtine periode. Aperiodsko titranje imamo uvijek kad je radni otpor titrajnog kruga jednak ili veći od dvostruke vrijednosti valnog otpora. Kao mjerilo za prigušene titraje upotrebljava se *logaritmički dekrement prigušenja* ϑ, a taj je jednak prirodnom logaritmu odnosa dviju susjednih pozitivnih ili negativnih amplituda struje ili napona.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kakve smo tri vrste titraja upoznali? *Odgovor:* Neprigušeno, prigušeno i aperiodsko titranje. — *P.*: Kako se razlikuju ove tri vrste titranja? *O.*: Kod neprigušenog titranja amplituda ostaje uvijek jednaka, kod prigušenog titranja pada po eksponencijalnom zakonu na nulu, dok kod aperiodskog titranja titraj prestaje nakon prve četvrtne periode. — *P.*: Pod kojim uvjetima nastaje aperiodsko titranje? *O.*: Ono nastaje onda, kad je radni otpor kruga veći ili jednak dvostrukom valnom otporu. — *P.*: Ima li radni otpor utjecaja na vlastitu frekvenciju titrajnog kruga? *O.*: Da, jer radi njega vlastita frekvencija postaje nešto niža. — *P.*: Čime se mjeri prigušenje titraja? *O.*: Logaritmičkim dekrementom prigušenja. — *P.*: Čime je dan taj faktor. *O.*: **Prirodnim** logaritmom odnosa dviju uzastopnih pozitivnih ili negativnih amplituda.

Pitanja

40. U koliko se titrajni krug može usporediti s njihalom, koje se njiše?
41. Čime se sve prigušuju električni titraji?
42. Pod kojim uvjetima nastaju neprigušeni, prigušeni i aperiodski titraji?

Zadaci

36. U antenskom krugu radioaparata imamo titrajni krug s induktivitetom 0.1 mH i kapacitetom 200 pF; a) na koju je frekvenciju ovaj krug ugođen; b) koliki je valni otpor ovog kruga; c) kolika je maksimalna efektivna jakost struje, koja teče kroz induktivitet, odnosno kroz kapacitet, ako je napon na jednom od njih 0,5 V?

37. Od induktiviteta 25 H i kapaciteta 40.000 pF načinjen je titrajni krug; a) kolika je vlastita frekvencija; b) koliki bi morao biti radni otpor da se vlastita frekvencija umanji za 10%?

38. Koliki mora biti radni otpor titrajnog kruga sastavljenog iz induktiviteta 10 H i kapaciteta 1.000 pF, da krug titra aperiodski?

122. — Izračunamo li logaritmički dekrement ϑ za dvije bilo koje uzastopne amplitude prigušenog titraja iz sl. 89., dobivamo[10]: $\vartheta = ln\ d = R \cdot T/2L$, gdje je prema jednadžbi (5) i (6) $T = 1/f = 2\pi/\omega_0$ trajanje titraja. Tako dobivamo da je: $\vartheta = R \cdot \pi/\omega_0 \cdot L$. Ako gubici nisu preveliki iz Thomsonove jednadžbe slijedi: $\omega L = L/\sqrt{L \cdot C} = \sqrt{L/C}$. Uvrstimo li ovu vrijednost u posljednji izraz za ϑ, dobivamo $\vartheta = \pi \cdot R \cdot \sqrt{C/L}$. S recipročnom vrijednošću oštrine rezonancije za napon (jednadžba 55) dobivamo: $\vartheta = \pi/\rho$. Time smo dobili za radiotehniku vrlo važne jednadžbe:

$$\boxed{\vartheta = \frac{\pi \cdot R}{\omega_0 L} = \pi \cdot R \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{\pi}{\varrho}} \quad . \quad . \quad (62)$$

Ovdje je, kao i obično, L u [H], C u [F], R u [Ω]. R opet predstavlja radni otpor, otpor gubitaka ili otpor prigušenja titrajnog kruga zamišljen kao da je spojen u seriju s L ili C.

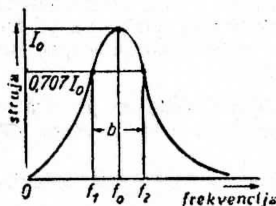
123. — Titrajni krugovi kod kojih su gubici vrlo maleni, imaju logaritmički dekrement prigušenja manji od 0,01. Stanovitim mjerama (kao što je „reakcija") može se prigušenje znatno smanjiti, na primjer na 0,001. Prigušenje titraja je prema jednadžbi (62) to **manje**, što je manji radni otpor R i kapacitet C, i što je **veći** induktivitet L. Napon, naprotiv, nema nikakvog utjecaja na prigušenje, jer njega nemamo u jednadžbi (62). Što je međutim kod istog prigušenja napon viši, to će titranje dulje trajati, to će dakle više titraja biti do prestanka titranja. Za velike otpore gubitaka jednadžba (62) nije više točna, te u tom slučaju Thomsonovu jednadžbu moramo zamjeniti jednadžbom iz odsjeka 120. Budući da titrajni krugovi s velikim gubicima dolaze u obzir vrlo rijetko, to se u ovo pitanje ne ćemo dublje upuštati.

[10]) Za one, koji su u matematici napredniji, dajemo kratki račun: Kako su tjemene vrijednosti, koje dolaze u izraz za d, međusobno udaljene za cijelu periodu, dakle za vrijeme T, bit će:

$$ln\ d = ln \frac{U_{m_1}}{U_{m_2}} = ln \frac{U_{m_0} \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t}}{U_{m_0} \cdot e^{-\frac{R}{2L}(t+T)}} = ln \cdot e^{\frac{R}{2L}(t+T) - \frac{R}{2L} \cdot t} =$$

$$= ln\ e^{\frac{RT}{2L}}, \text{ dakle } ln\ d = \frac{R \cdot T}{2L}$$

124. — Sada ćemo upoznati još jedan novi pojam za prosuđivanje valjanosti titrajnog kruga. Na sl. 90 vidimo opet krivulju rezonancije. Što je prigušenje titrajnog kruga manje, to je krivulja rezonancije strmija (vidi sl. 76). Struju rezonancije I_0 postizavamo uz frekvenciju f_0, dok je kod susjednih frekvencija f_1 i f_2 jakost struje jednaka još samo $I_0/\sqrt{2} = 0{,}707 \cdot I_0$. Ako jakost struje mjerimo termičkim instrumentom, on će pokazivati kod tih frekvencija samo *pola* otklona od onoga kod rezonantne frekvencije. Razlika u frekvenciji $b = f_2 - f_1$ naziva se širina pojasa, a može se definirati ovako[11]: „*Širina pojasa jednaka je širini krivulje rezonancije za jakost struje, odnosno visinu napona, $1/\sqrt{2} = 0{,}707$ od vrijednosti, koju te veličine imaju kod rezonantne frekvencije.*" Što je manja širina pojasa kod određene rezonantne frekvencije, to je manje prigušenje. Izračunamo li tu širinu, dobivamo[12]):



Sl. 90

$$b = f_2 - f_1 = \frac{R}{2\pi \cdot L} = 0{,}1592 \cdot \frac{R}{L} \tag{63}$$

Kako se vidi iz krivulja na sl. 75., 76 i 90., n e l e ž i rezonantna frekvencija t o č n o u s r e d i n i između frekvencija f_1 i f_2, tako da ne vrijedi niti odnos $f_0 = (f_1 + f_2)/2$. Sva ova pitanja u vezi su sa titrajnim krugovima u prijemnicima, pa se s njima moramo bezuvjetno dobro upoznati.

Ponavljanje

Logaritmički dekrement prigušenja dan je izrazom: $\vartheta = \pi \cdot R/\omega_0 L = \pi \cdot R\sqrt{L/C} = \pi/\rho$. Za krugove s malenim gubicima ovaj dekrement je redovito manji od 0,01. Prigušenje titrajnih krugova je maleno, ako ti krugovi imaju maleni radni otpor, maleni kapacitet i veliki induktivitet. Valjanost titrajnog kruga određena je i širinom pojasa krivulje rezonancije, to jest udaljenošću

---

[11]) Često se širina pojasa daje za jakost struje, odnosno visinu napona jednaku *polovini* vrijednosti kod rezonancije. U tom slučaju je $b = \sqrt{3} \cdot R/2\pi \cdot L = 0{,}2755 \cdot R/L$. Za vrijednost jakosti struje $I_0/\sqrt{2}$ učin u titrajnom krugu pada na *polovinu*, jer je proporcionalan vrijednosti $(I_0/\sqrt{2})^2 = I_0^2/2$.

[12]) Iz jednadžbe (48) slijedi, kad se uzme u obzir, da je prividni otpor serijskog spoja L i C u slučaju rezonancije jednak ukupnom otporu gubitaka R: $I_0/\sqrt{2} = U\Big/\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = U/\sqrt{2} \cdot R$, dakle $R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 = 2R^2$ ili $\omega L - (1/\omega C) = R$. Odatle slijedi $\omega^2 - (R\omega/L) - (1/L \cdot C) = 0$. Ako ovu kvadratičnu jednadžbu riješimo po ω, dobivamo $\omega = \pm(R/2L) \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} + \frac{1}{L \cdot C}}$. Od četiri moguće vrijednosti za ω dvije su pozitivne. Odbijemo li ih, dobivamo $\omega_2 - \omega_1 = 2\,R/2\,L$ ili $f_1 - f_2 = R/2\pi \cdot L$.

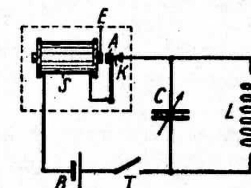
točaka, kod kojih je struja, odnosno napon 0,707-kratnik rezonantne struje, odnosno napona. Za širinu pojasa b vrijedi: $b = f_2 - f_1 = 0{,}1592 \cdot R/L$. Što je manja širina pojasa, to je manje prigušenje i strmija krivulja rezonancije.

Pitanja i odgovori

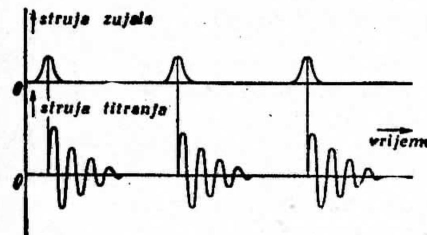
Pitanje: Koji su uvjeti za maleni logaritmički dekrement prigušenja titrajnog kruga? *Odgovor:* Malen radni otpor, malen kapacitet i velik induktivitet. — *P.*: Kakav je odnos između logaritmičkog dekrementa prigušenja i oštrine rezonancije? *O.*: Prema jednadžbi (62) ove dvije veličine su recipročne. — *P.*: U kojim granicama se kreće logaritmički dekrement prigušenja za dobre titrajne krugove? *O.*: Između 0,001 i 0,01. — *P.*: Kakvim se još pojmom može odrediti valjanost titrajnog kruga? *O.*: Širinom pojasa krivulje rezonancije. — *P.*: Kako je definiran taj pojam? *O.*: Kao razlika frekvencija, kod kojih je jakost struje jednaka $1/\sqrt{2} = 0{,}707$ jakosti struje za rezonantnu frekvenciju.

Proizvođenje visokofrekventnih titraja

125. — U dosadašnjim razmatranjima vidjeli smo, da se titrajni krug može jednokratnim nabijanjem kondenzatora pobuditi na titranje. Budući da u titrajnim krugovima imamo redovito gubitaka, nakon nekog vremena titraji prestaju. Želimo li međutim da titranje traje dugo, moramo se pobrinuti da nakon svakog titraja kondenzator nanovo nabijemo. To najjednostavnije možemo načiniti pomoću *prekidača* (zujalo, kao na sl. 91.) pa na taj način dobivamo jednostavni g e n e r a t o r s a z u j a l o m. Zujalo se sastoji od zavojnice S, koja ima željeznu jezgru E, zatim elastičnog pera A i para kontakta K. Kako se po svemu vidi, nije to ništa drugo nego poznati Wagnerov batić iz elekričkog zvonca. Zatvorimo li uklopac T, kontakti K još su zatvoreni, a promjenljivi kondenzator C, titrajnog kruga L—C, nabija se do napona baterije B. U slijedećem momentu struja, koja se zatvara preko B—S—A—K—L—T—B, stvara magnetsko polje u zavojnici S, pa željezna jezgra E privuče pero A, te se kontakti K rastave. Titrajni krug L—C prepušten je sada sam sebi. Naboj na kondenzatoru izjednačuje se u obliku prigušenih titraja preko zavojnice L. Kako je međutim uslijed prekida na kontaktima zujalo ostalo bez struje, pero A se vraća u svoj početni položaj, u kojem su kontakti K opet spojeni. Nakon toga nastaje novo nabijanje kondenzatora C. Čitava opisana igra se ponavlja, pa imamo opet novi slijed prigušenih titraja u krugu L—C. Na sl. 92. prikazan je tok struje, koja teče kroz zujalo, i tok struje u titrajnom krugu.



Sl. 91.

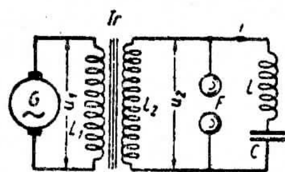


Sl. 92.

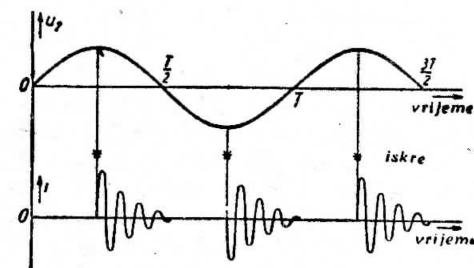
126. — Frekvencija visokofrekventnih titraja proizvedenih u generatoru sa zujalom određena

je Thomsonovom jednadžbom. Uz induktivitet $L = 1$ mH, i kapacitet $C = 490$ pF bit će na primjer frekvencija tih titraja $f \approx 230$ kHz. Promjenljivi kondenzator C omogućuje kontinuiranu promjenu frekvencije proizvedenih titraja. Iz sl. 92 vidimo dalje da nabijanje kondenzatora, pa dakle ni prekidanje zu alom, ne smije biti prebrzo, da bi se prigušeni titraji mogli nesmetano stvarati. Zbog razmjerno velikog prigušenja amplitude ovih titraja past će vrlo brzo na nulu, te će kod ne prevelikog broja prekida („frekvencija zujala") biti još dosta velike stanke između pojedinih nabijanja kondenzatora. Frekvencija zujala redovito je oko 1 000 Hz. Zbog velikog prigušenja je energija, koju jedan ovakav jednostavni generator može dati, vrlo malena Zbog toga se generatori sa zujalom upotrebljavaju još samo za mjerenja (na primjer kod valomjera) u radiotehnici.

127. — Poboljšanje u jednoličnosti rada i energetskim odnosima dade se postići pomoću generatora s iskrištem. Kod takvog generatora izmjenični napon u_1 daje generator izmjenične struje G (sl. 93.). Taj napon se pomoću transformatora Tr transformira na mnogo višu vrijednost. Transformator se sastoji od dviju zavojnica L_1 i L_2 na zajedničkoj željeznoj jezgri. Izmjenični napon u_1 na zavojnici L_1, koja ima malo zavoja, po zakonu indukcije, proizvodi na zavojnici L_2, koja ima vrlo mnogo zavoja, vrlo visoki izmjenični napon u_2 (proporcionalan odnosu zavoja). Paralelno sa L_2 postavljeno je „iskrište", koje se sastoji od dviju metalnih kuglica. Kad napon u_2 na zavojnici, a prema tome i naboj kondenzatora C, postigne svoju maksimalnu vrijednost, između kuglica iskrišta preskoči iskra. Budući da ona za titrajni krug $L—C$ znači kratki spoj, to se kondenzator C preko nje i preko zavojnice L ispražnjuje u obliku prigušenih titraja (sl. 94.) Kad se izbijanje kondenzatora završi, iskra se ugasi. Za vrijeme procesa titranja vrijednost napona u_2 pada na nulu, a nakon toga postigne svoju maksimalnu negativnu vrijednost. Kondenzator se tada nanovo nabije i izbije preko iskre stvarajući ponovno prigušeno titraje.



Sl. 93.



Sl. 94.

128. — Također i titraji proizvedeni pomoću generatora s iskrištem su znatno prigušeni. Tome su u prvom redu razlozi iskre, koe veći dio raspoložive energije pretvaraju u beskorisnu toplinu. Poboljšanje prilika u pogledu energije može se postići smanjivanjem stanki između pojedinih iskara. To međutim ima granicu kod frekvencije od kakvih 100 Hz, dakle kod kakvih 200 iskara na sekundu. Kod većeg broja iskara iskrenje bi trajalo duže, nego sam proces izjednačenja u obliku titranja, pa bi mjesto iskara na iskrištu imali luk. Broj iskara dade se međutim ipak povisiti na oko 2 000 u sekundi, ako se

iskrište razdijeli u više iskrišta, koja su spojena u seriju, a umjesto kuglica se uzmu bakrene ploče razmaknute 0,1 do 0,2 mm. Dobro odvođenje topline uslijed upotrebe bakrenih ploča i maleni razmak ploča znatno smanjuje trajanje iskre.

Ponavljanje

Generatorom sa zujalom možemo proizvoditi visokofrekventne prigušene titraje. Periodično nabijanje kondenzatora u titrajnom krugu vrši se pomoću zujala. Prigušeno titranje nastaje u momentima, kad su kontakti zujala otvoreni. Veće energije mogu se postići upotrebom *generatora s iskrištem*. Nabijanje kondenzatora u ovom slučaju ne prekida se zujalom, nego iskrištem. Za vrijeme, dok je iskrište zatvoreno iskrom, izbija se kondenzator u obliku prigušenih titraja. Prigušenje uzrokovano djelovanjem iskre dade se znatno smanjiti, ako se umjesto običnog iskrišta upotrijebi podijeljeno (serijsko) iskrište.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kako kod generatora sa zujalom dolazi do stvaranj titraja? *Odgovor*: Kondenzator titrajnog kruga nabija se periodski preko zujala. U momentima, kad su kontakti zujala otvoreni, izbija se kondenzator u obliku prigušenih titraja. — *P.*: O čemu je ovisna frekvencija ovako proizvedenih titraja? *O.*: O induktivitetu i kapacitetu titrajnog kruga, prema Thomsonovoj jednadžbi. — *P.*: Kakve prednosti ima generator s iskrištem? *O.*: On daje mnogo jednoličnije titraje, a i proizvedena energija je mnogo veća od one, koju može dati generator sa zujalom. — *P.*: Od kakvog značaja su iskre kod generatora s iskrištem? *O.*: Iskre stvaraju kratki spoj u titrajnom krugu, koji je inače otvoren, pa se preko njih kondenzator može izbiti u obliku neprigušenih titraja. — *P.*: Koje su mane iskara? *O.*: One uzrokuju jako prigušenje titraja (gubici u toplini). — *P.*: Kako se ova mana može umanjiti? *O.*: Upotrebom podijeljenog (serijskog) iskrišta.

Pitanja

43. Kakvi matematski izrazi služe za određivanje valjanosti električkog titrajnog kruga?

44. Kako se izračunava širina pojasa rezonantne krivulje, i u kojim jedinicama moraju biti uvrštene vrijednosti, koje ovdje dolaze?

45. Čime se objašnjava povoljnije djelovanje podijeljenog iskrišta prema običnom?

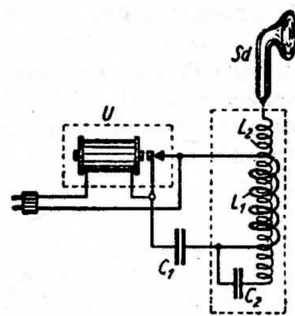
Zadaci

39. Titrajni krug se sastoji od zavojnice s induktivitetom 0,1 mH i radnim otporom 1,5 Ω i kondenzatora s kapacitetom 400 pF. Koliki je logaritmički dekrement prigušenja i kolika je širina pojasa krivulje rezonancije?

40. Zavojnica sa željeznom jezgrom, odnosno zavojnica bez željezne jezgre, imaju kod frekvencije 1,2 MHz logaritmički dekrement prigušenja 0,018 odnosno 0,036. Kolika je širina pojasa krivulje rezonancije?

41. — Pomoću generatora s iskrištem mora se proizvesti prigušene visokofrekventne titraje frekvencije 150 kHz. Svaka serija titraja prestaje nakon 50 titraja. Kolika mora biti frekvencija generatora izmjenične struje, ako stanka između svake iskre traje 1/6.000 s?

129. — Jedan daljnji uređaj, koji se upotrebljava za proizvođenje visokofrekventnih titraja, vidimo na sl. 95 (ovakvi uređaji upotrebljavaju se u medicinske svrhe). Vidimo opet zujalo U, koje radi sa 15 do 30 prekida u sekundi. Kontakti na mjestu prekida premošteni su „primarnim" titrajnim krugom $L_1 - C_1$. Induktivitet L_1 je dosta malen, dok je kapacitet C_1 prilično velik. Ovaj titrajni krug uzbuđuje se periodskim nabijanjem kondenzatora C_1, prema odsjeku 125., na prigušeno titranje. Titrajni krug $L_1—C_1$ vezan je induktivno, a preko kondenzatora C_2 kapacitivno, na „sekundarni" titrajni krug, koji ima zavojnicu L_2 s vrlo mnogo zavoja. Na prvi pogled izgleda da u sekundarnom titrajnom krugu nema kapaciteta jer kondenzator C_2 služi samo kao kondenzator za vezu. Kapacitet međutim ipak postoji u obliku (iako neznatnoga) vlastitoga kapaciteta zavojnice. U slučaju rezonancije (kad naime vlastita frekvencija primarnog kruga odgovara vlastitoj frekvenciji sekundarnog kruga) pojavljuju se na zavojnici L_2 vrlo visoki naponi, koji mogu iznositi nekoliko stotina kilovolta kod frekvencija od nekoliko megaherca. Oba titrajna kruga tvore takozvani visokofrekventni transformator ili Teslin transformator (po našem Nikoli Tesli, rođ. 1857 u Smiljanu u Lici). Na gornjem kraju zavojnice L_2 nalazi se staklena sonda Sd (elektroda), s koje se visokofrekventne izmjenične struje kapacitivnim putem prenose na tijelo. Ove visokofrekventne struje su za čovječje tijelo usprkos visokog napona neškodljive. Zbog visoke frekvencije i time uvjetovanog skin-efekta one teku gotovo isključivo po površini tijela. Djelovanje ovog uređaja opisali smo zbog toga, što ćemo se na njega kasnije opet vratiti, kad budemo govorili o otklanjanju smetnja kod radioaparata.

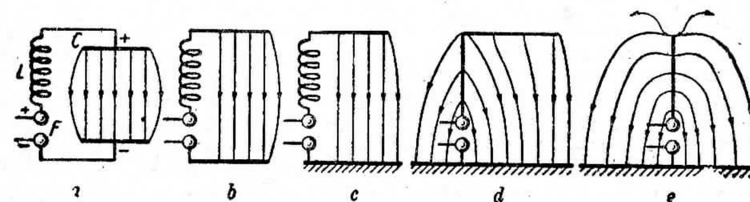


Sl. 95.

130. — Sa svim do sada opisanim generatorima mogu se proizvoditi samo prigušeni titraji. Za proizvođenje neprigušenih titraja, kakvi su potrebni u radiotehnici, postoje drugi postupci. U prvim danima radiotehnike (oko god. 1900) upotrebljavali su se za to lučni generatori Titrajni krug se uzbuđivao lukom, koji je nastajao između dva ugljena štapa. Gubici u toplini i isijavanju stalno su se nadoknađivali energijom, koju je luku davao generator istosmjerne struje, pa su mogli nastajati neprigušeni titraji. Frekvencija ovih titraja bila je u najboljem slučaju nekoliko stotina kiloherca, a energija je pri tome iznosila i do 1.000 kW. Kasnije su dugo vremena vrlo važnu ulogu imali strojni generatori. To su bili generatori izmjenične struje posebnog načina gradnje, koji su uz stanovite zahvate (umnažanje frekvencije) mogli proizvoditi struje s frekvencijom do 1 MHz, a učini su im pri tome bili više stotina kilovata. U opisivanje ovih generatora ne ćemo se međutim upuštati, jer su oni u modernoj radiotehnici posve istisnuti generatorima s elektronkama, o kojima ćemo kasnije govoriti opširnije.

Otvoreni titrajni krug

131. — Između obloga nabijenog kondenzatora postoji električko polje, koje karakteriziraju linije polja (sl. 85.-*a*, *c*, *e*). Što su oblozi kondenzatora jedan od drugoga dalje, to je polje među njima slabije, i to više linija polja se „rasipa". Polje izvan kondenzatora je vrlo slabo, te se njegovo postojanje može ustanoviti samo u malenoj udaljenosti. Na sl. 96.-a u titrajnom krugu



Sl. 96.

vidimo kondenzator s velikim razmakom ploča. Titrajni krug osim zavojnice L ima još i iskrište F. Električko polje postoji i onda, ako oba obloga zamijenimo dvjema ravnim paralelnim žicama (sl. 96.-b). Možemo štoviše donju žicu i ispustiti i zamijeniti dobro vodljivom zemljom (sl. 96.-c). Kondenzator titrajnog kruga C postoji sada još samo u obliku vodoravne žice i zemlje kao drugog obloga. U ovom slučaju se postojanje električkog polja može ustanoviti i u većim daljinama, pa kažemo da dolazi do isijavanja energije električkog pol a. Za razliku od dosadašnjih zatvorenih titrajnih krugova, ovakav krug nazivamo otvorenim. Štoviše, često u ovakvom krugu nije ni potrebno imati posebnu zavojnicu L, jer i ravni vodič ima stanoviti induktivitet. Ako dakle zavojnicu ispustimo, dobivamo uređaj kao na sl. 96.-*d*. Linije polja postoje sada između okomite žice i zemlje, jer i ova žica ima prema zemlji stanoviti kapacitet. Konačno u ovom ispuštanju možemo učiniti i posljednji korak, pa ispustiti i vodoravnu žicu. Onda nam ostaje samo vertikalna žica; no i sada imamo titrajni krug (sl. 96.-e). Iz ove slike vidi se dobro, kako se linije polja šire u prostor. Žice, koje imamo u posljednjim dvjema slikama, nazivaju se antenama (prema latinskom: antenna = ticalo). Sl. 96.-d predstavlja *L-antenu*, a sl. 96.-e *Marconijevu* antenu.

Ponavljanje

Aparat prikazan sl. 95. također predstavlja generator prigušenih visokofrekventnih titraja. Na sekundarnoj strani *Teslinog transformatora*, koji ima visoki prijenosni odnos, zbog rezonantnog djelovanja primarnog titrajnog kruga, nastaju visokofrekventne struje vrlo visoke napetnosti, koje se preko elektrode s razrjeđenim zrakom prenose na ljudsko tijelo. *Neprigušeni titraji* mogu se proizvoditi lučnim generatorima, generatorima s elektronkama i strojnim generatorima.

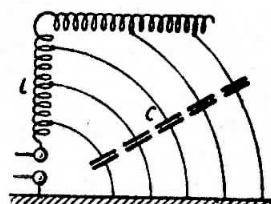
Ako ploče kondenzatora u titrajnom krugu jednu od druge udaljimo, nastaje *otvoreni titrajni krug*. Za razliku od zatvorenog titrajnog kruga, koji nema nikakvog znatnijeg djelovanja na daljinu, titraji otvorenog titrajnog kruga mogu se zamijetiti i u većoj udaljenosti. Titraji se naročito dobro pre-

nose u prostor, ako se ploče kondenzatora titrajnog kruga zamijene dugom žicom i zemljom. Na taj način dobivamo *antenu*. Najjednostavnija antena je jednostavna žica postavljeno okomito (*Marconi-antena*) ili savijena u obliku slova L (*L-antena*).

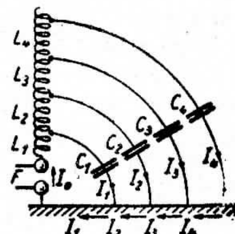
Pitanja i odgovori

Pitanje: Kako kod generatora, koji se upotrebljavaju u medicinske svrhe, dolazi do visokofrekventnih titraja s velikom napetošću? *Odgovor*: Upotrebom Teslinog trans.ormatora. Ako je primarni titrajni krug u rezonanciji sa sekundarnim, nastaju vrlo visoke sekundarne napetosti. — *P.*: Kakve neugodnosti stvaraju ovakvi medicinski uređaji? *O.*: Ako nisu snabdjeveni uređajem za otklanjanje smetnji, isijavaju visokofrekventne titraje u prostor i smetaju radioprijem u znatnoj udaljenosti. — *P.*: Kavim uređajima možemo proizvoditi neprigušene titraje? *O.*: Lučnim generatorima, generatorima s elektronkama i strojnim generatorima. — *P.*: Što je otvoreni titrajni krug? *O.*: Titrajni krug, čije se djelovanje za razliku od djelovanja zatvorenog titrajnog kruga može zamijetiti i u znatnoj udaljenosti. — *P.*: Čime se postizava ovo djelovanje na daljinu? *O.*: Velikim razmakom ploča kondenzatora titrajnog kruga. — *P.*: Kako se to djelovanje može pojačati? *O.*: Upotrebom antene. — *P.*: Kakve vrste antena smo dosada upoznali? *O.*: Marconi-antenu i L-antenu. — *P.*: Predstavlja li ovakav uređaj titrajni krug? *O.*: Da, jer svaki komad žice obješen vertikalno ili horizontalno iznad zemlje ima osim kapaciteta prema zemlji i induktivitet.

132. — Induktivitet i kapacitet antene nisu koncentrirani na jednom mjestu, nego su p o d i j e l j e n i uzduž čitave antene. Antena se prema tome sastoji od beskonačnog broja pojedinih titrajnih krugova $L—C$ (sl. 97.). Pojedinačni kondenzatori imadu prema zemlji to veći kapacitet, što je bliže zemlji onaj dio antene, kojemu pripadaju (manji razmak ploča!). Kod L-antene, prema sl. 97., i vertikalni i horizontalni dio ima svoj kapacitet prema zemlji. U sl. 98. prikazane su iste prilike za jednu vertikalnu (Marconijevu) antenu. Ovdje su na primjer nacr'ana četiri pojedinačna titrajna kruga $L—C$. Nabijemo li antenu preko iskrišta F, podijelit će se napon po čitavoj anteni, pa ćemo dobiti polje prikazano linijama na sl. 96.-e. Kod izbijanja antene teći će pojedinačne struje izbijanja kroz pojedinačne kapacitete C k zemlji.



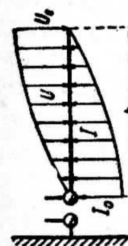
Sl. 97.



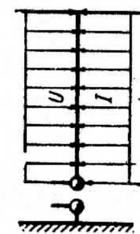
Sl. 98.

133. — Budući da su ovi kapaciteti u većoj visini antene sve manji, i jakost struje I mora postajati sve manja. Na vrhu antene zbog neznatnog kapaciteta vrijednost struje je praktički nula. Najniži dio antene ima najveći kapacitet, pa će i struja na tom mjestu poprimiti svoju maksimalnu vrijednost I_0, što je i razumljivo, jer na tom mjestu dolazi do zbrajanja svih pojedinačnih struja. Na ovakvoj anteni imamo dakle posve drugačije prilike od onih u zatvorenom titrajnom krugu, u kojem je efektivna jakost struje I svagdje podjednako velika. Podjelu struje I u jednoj vertikalnoj anteni vidimo na sl. 99.,

gdje su jakosti struje u pojedinim točkama označene horizontalnim strelicama. Ove prilike sa strujom u anteni dadu se usporediti s riječnim tokom. Količina vode u rijeci počevši od izvora raste (vrh antene), jer u svojem daljnjem toku dobiva sve veću količinu vode iz pritoka. Na ušću rijeke (najniži dio antene) količina vode je najveća. Napon U na anteni (prema zemlji) pomaknut je (vidi sl. 24. i odsjek 32.) prema struji za četvrtinu periode, što je ponovo prikazano na sl. 99. Maksimalne vrijednosti I_0, odnosno U_0, nazivaju se t r b u s i m a s t r u j e ili n a p o n a, a minimalne (ovdje nula) s t r u j n i m ili n a p o n s k i m č v o r o v i m a. Vertikalna antena ima prema tome na donjem kraju trbuh struje i čvor napona[13]. *T* - a n t e n a (sl. 100.) isto tako kao i *L* - a n t e n a, za razliku od Marconijeve antene ima i na svome gornjem kraju znatan kapacitet prema zemlji, tako da jakost struje na gornjem kraju nije jednaka nuli. Zbog kapaciteta na vrhu kod *T*-antene su struja i napon po čitavoj anteni praktički jednaki, kako se to vidi i na sl. 100.

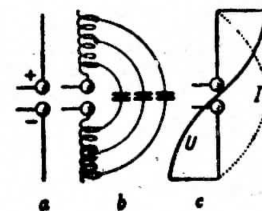


Sl. 99.



Sl. 100.

134. — Na sl. 101.-a vidimo konačno još jednu vrstu antene poznatu iz prvih početaka radiotehnike, no i danas mnogo upotrebljavanu. To je takozvana d i p o l - a n t e n a. Ona se u najjednostavnijem slučaju sastoji od dviju jednako dugih žica priključenih na oba pola iskrišta. Ovakvu antenu upotrebljavao je već i *Henrik Hertz* kod svojih klasičnih pokusa, kojima je thio dokazati istovjetnost elektromagnetskih valova i vidljivog svijetla (vidi odsjek 143. i sl. 108.). Na sl. 101.-b vidimo nadomjesnu shemu takve antene, a na sl. 101.-c, raspodjelu struje i napona. U sredini antene je trbuh struje i čvor napona, jer srednji dijelovi antene imaju najveći međusobni kapacitet i na tim mjestima dolazi do zbrajanja svih pojedinačnih struja. Na oba kraja antene je zbog malenog kapaciteta po jedan strujni čvor i po jedan trbuh napona. S dipol-antenama upoznat ćemo se opširnije kasnije, kad bude govora o prijemnicima i odašiljačima kratkih valova.



a b c

Sl. 101.

---

[13]) Zbog nejednolične podjele struje i napona po anteni dobivamo mjerenjem različne vrijednosti za kapacitet, odnosno induktivitet antene, već prema frekvenciji struje kojom se mjerenje vrši. Ako se upotrijebi n i s k o f r e k v e n t n a izmjenična struja, jakost struje je u danom momentu jednaka po čitavoj duljini antene, pa mjerenje daje s t a t i č k i k a p a c i t e t odnosno *induktivitet* antene. Ako se upotrijebi v i s o k o f r e k v e n t n a izmjenična struja, imamo, kako je već rečeno, nejednoličnu podjelu struje i napona, pa je kapacitet odnosno induktivitet, dobiven mjerenjem ovakvom strujom, znatno m a n j i nego u prvom slučaju, a naziva se *efektivnim* ili *dinamičkim kapacitetom*, odnosno *induktivitetom*.

Ponavljanje

Antena se sastoji od beskonačnog broja međusobno vezanih titrajnih krugova. Za razliku od zatvorenog strujnog kruga u anteni imamo na svakom mjestu drugačiju jakost struje. Marconijeva antena ima na donjem dijelu *trbuh* struje ($I = I_0$) i *čvor* napona ($U = 0$), dok su kod *T*-antene struja i napon jednoliko porazdijeljeni po čitavoj duljini. Kod *dipol-antene*, koja se sastoji od dviju jednakih žica, u sredini je trbuh struje i čvor napona, a na oba kraja su čvorovi struje i trbusi napona.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Čime se dade prikazati antena? *Odgovor*: Beskonačnim brojem titrajnih krugova, jer svaki dio antene ima svoj induktivitet i kapacitet. — *P.*: Kakva je razlika u podjeli struje između antene i zatvorenog titrajnog kruga? *O.*: U anteni je jakost struje u svakoj točki različita, dok kroz zatvoreni krug teče svagdje ista struja. — *P.*: Čime se objašnjava ovakvo stanje u anteni? *O.*: Pojedini dijelovi antene imaju različite kapacitete prema zemlji ili među sobom. — *P.*: Što je trbuh struje, a što čvor napona? *O.*: Trbuh struje je maksimalna jakost struje, a čvor napona je minimalni napon na anteni. — *P.*: Gdje su ove točke kod vertikalne antene? *O.*: Na donjem dijelu antene. — *P.*: Što je dipol? *O.*: Antena, koja se sastoji od dviju ravnih jednako dugih žica. — *P.*: Kakva je podjela struje i napona po dipolu? *O.*: U sredini dipola je trbuh struje i čvor napona, a na oba kraja su čvorovi struje i trbusi napona.

Pitanja

46. Zašto su visoki naponi visokofrekventnog generatora kakvi se upotrebljavaju u medicinske svrhe, ljudskom tijelu općenito neškodljivi?

47. Navedi i nacrtaj oblike antena, o kojima je dosada bilo govora!

48. Kakvo djelovanje imaju vodoravni dijelovi antene?

Zadaci

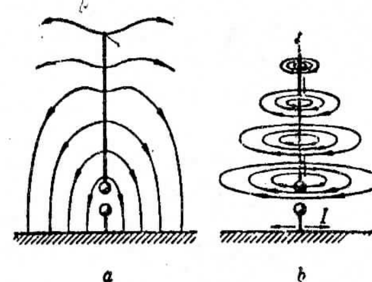
42. Antena nekog prijemnika ima efektivni induktivitet 18 μH i efektivni kapacitet 200 pF; a) kolika je vlastita frekvencija antene, b) kakav induktivitet moramo ukopčati u seriju s antenom, da ona bude ugođena na frekvenciju 841 kHz?

43. Nacrtaj podjelu struje i napona na Marconijevoj anteni, *T*-anteni i dipol-anteni!

Isijavanje elektromagnetskih valova

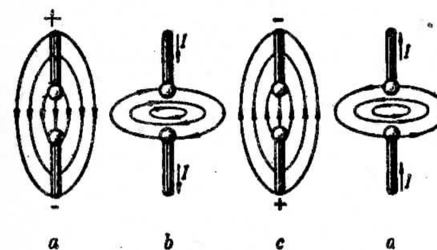
135. — U dosadašnjim razlaganjima o djelovanju antene govorili smo samo o e l e k t r i č k o m polju. U odsjeku 115. i na sl. 85. vidjeli smo međutim, da se u zavojnici titrajnog kruga stvara i m a g n e t s k o polje. Isto vrijedi i za otvorene titrajne krugove, dakle i za antene. Na sl. 102-a vidimo još jedamput električko polje jedne vertikalne nabijene antene. Preskoči li preko iskrišta iskra, izbija se antena u obliku titraja; pri tome nastaje struja *I*, a ova kao i svaka struja, stvara oko sebe magnetsko polje. Linije magnetskog polja okružuju žicu antene u obliku koncentričnih krugova. Kako je međutim, prema sl. 99, jakost struje na iskrištu najveća, to će ovdje i djelovanje magnetskog polja biti najjače. Na gornjem kraju antene je jakost struje jednaka nuli, pa

na ovom mjestu ne će uopće biti magnetskog polja. Različita jakost polja prikazana je na sl. 102-b krugovima različite veličine. Nakon toga što se završilo izbijanje, prema teoriji titrajnih krugova antena će se ponovno nabiti, i to u protivnom smjeru. Poslije četvrtine periode dolazi opet do razaranja električkog i stvaranja magnetskog polja, protivnog dakako onome prije, i t. d. I ovdje, kao i kod zatvorenih titrajnih krugova možemo, dakle, utvrditi, da se nakon svake četvrtine periode magnetsko polje pretvara u električko i obrnuto. Zbog toga, što se smjer tih polja neprestano mijenja, govorimo o i z m j e n i č n o m e l e k t r o m a g n e t s k o m polju. Iz sl. 102 možemo vidjeti, *da su polja električko i magnetsko međusobno okomita.*



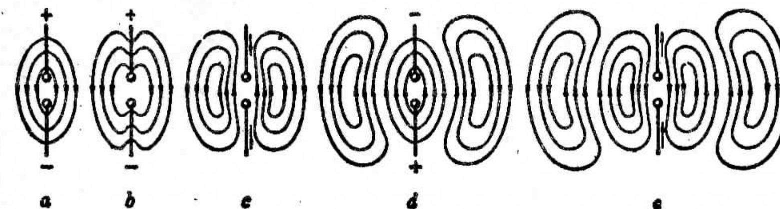
Sl. 102.

136. — Iste pojave imamo i kod dipol-antena, kako to vidimo na sl. 103 Električko polje nabijenog d i p o l a (sl. 103-a) pretvara se nakon jedne četvrtine periode u magnetsko (sl. 103-b). Nakon slijedeće četvrtine periode dipol je opet nabijen, ali u protivnom smjeru pa i električko polje ima sada protivan smjer (sl. 103-c). Poslije toga izbija se dipol ponovo, te se u slijedećoj četvrtini periode stvara magnetsko polje, ali i ono sada protivnog smjera (sl. 103-d).



Sl. 103.

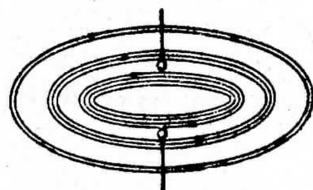
137. — Iz sl. 96-d, 96-e, 102 i 103 možemo vidjeti, da linije električkog i magnetskog polja nastoje da se šire u prostor, isto kao i valovi, koje uzrokuje kamen bačen u vodu. Uz pomoć sl. 104 pogledat ćemo ovo „širenje" pobliže. Na sl. 104-a vidimo opet električko polje nabijenog dipola. Za vrijeme



Sl. 104.

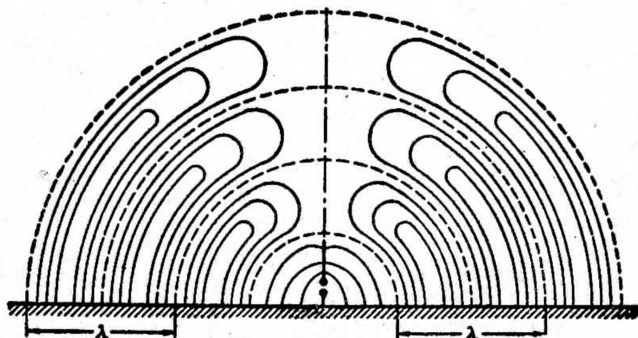
izbijanja preko iskrišta linije polja se skupljaju (sl. 104-b), pa se nakon prve četvrtine periode odvajaju od dipola kao zatvoreni snopovi linija (sl. 104-c). U ovom momentu je dipol izbijen. Struja izbijanja, koja i dalje teče, uzrokuje ponovo nabijanje u protivnom smjeru. Nakon druge četvrtine periode dipol je

okružen električkim poljem protivnog smjera, a prvi snop linija polja već se udaljio i povećao (sl. 104-d). Za vrijeme treće četvrtine periode opet se linije polja kao i u početku skupljaju, zatim se od dipola odvajaju i odlaze kao novi samostalni snop. Prvi snop je u međuvremenu već daleko. Na koncu treće četvrtine periode imamo dakle stanje prikazano slikom 104-e. Dipol je sada o et izbijen, a jakost struje postigla je svoju maksimalnu vrijednost. Nakon toga ponavlja se čitav proces iznova.


Sl. 105.

138. — Slično se događa i s magnetskim poljem. Kako vidimo na sl. 105., šire se linije magnetskog polja oko dipola u obliku koncentričnih krugova. Kad je dipol izbijen, dakle kad nema električkog polja, okružen je najvećim brojem magnetskih linija. Što titranje dipola traje dulje, to dalje se šire oba polja na sve strane u prostor. Pri tome električko polje poprima konačno oblik k u g l e. Iz onoga što je dosada rečeno vidi se, da *antena i s i j a v a električku i magnetsku energiju u prostor.* Približna mehanička slika ove pojave jesu krugovi dima, što ih puštaju pušači.

139. — Na sl. 106 vidimo odvajanje i širenje električkog polja vertikalne antene, koja je na jednoj strani uzemljena. Zbog dobre vodljivosti zemlje linije električkog polja mogu se stvarati samo na gornjoj strani, u vodiču ne može postojati e l e k t r i č k o polje, nego jedino električka struja. M a g n e t s k e



Sl. 106.

linije vertikalne antene šire se prema sl. 105 u horizontalnim ravninama. U velikoj udaljenosti od antene stoje linije električkog polja približno okomito na površinu zemlje. Kod velikih udaljenosti ovo vrijedi i za sve druge oblike antene, na primjer za *L*-antenu i *T*-antenu. Sl 106 vrijedi samo za zemlju, koja ima savršenu vodljivost. Zbog razlike u vodljivosti stvarna slika izgledat će manje ili više drugačije. Gornja razmatranja prikazuju međutim s dovoljnom točnošću prilike isijavanja za svaku uzemljenu antenu.

Ponavljanje

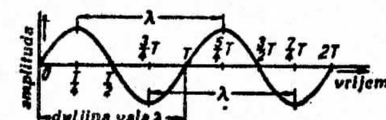
Antena pobuđena na titranje isijava električko i magnetsko polje, koje se zove *izmjenično elektromagnetsko polje.* E l e k t r i č k o polje neuzemljene antene poprima u dosta velikoj udaljenosti od antene oblik kugle. M a g n e t s k o polje širi se naprotiv u obliku koncentričnih krugova oko antene u horizontalnim ravninama. Kod u z e m l j e n e antene može se stvarati samo gornja polovica električkog polja, te polje poprima oblik polukugle, dok magnetsko polje ima isti oblik, kao i kod neuzemljene antene.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Uslijed čega se stvara magnetsko polje oko antene, u kojoj postoji titranje? *Odgovor*: Struja izbijanja uzrokuje, kao i svaka druga struja, magnetsko polje. — *P.*: Kakav oblik imaju linije magnetskog polja? *O.*: Imaju oblik koncentričnih krugova, kojima je antenska žica središte. — *P.*: Kako se može ustanoviti smjer linija magnetskog polja? *O.*: Pravilom desne ruke. — *P.*: Što je izmjenično elektromagnetsko polje? *O.*: Polje sastavljeno izmjenično od linija magnetskog i električkog polja promjenljivog smjera. — *P.*: Kako se širi elektromagnetsko polje oko dipol-antene? *O*: Električko polje ima u dovoljnoj udaljenosti od antene oblik kugle, a magnetsko polje oblik koncentričnih krugova u horizontalnim ravninama. — *P.*: Da li isto vrijedi i za uzemljene antene? *O.*: Samo ukoliko se odnosi na magnetsko polje, inače, zbog vodljivosti zemlje električko polje ima oblik polukugle.

140. — U posljednjem odsjeku upoznali smo se s isijavanjem elektromagnetske energije, koju isijava antena pobuđena na titranje. Titraji, koji nastaju u anteni, šire se preko *etera,* nosioca vidljivog i nevidljivog svjetla, kroz prostor na sve strane, Za razliku od periodičnog titranja oko nekog srednjeg položaja mirovanja kod širenja ovakvih titraja govorimo o v a l o v i m a. I ovdje je, kao i kod vode: Zbog međusobnog guranja čestica šire se titraji u obliku valova. V a l je dakle uvijek v e z a n na proces š i r e n j a. *Brzina širenja elektromagnetskih valova jednaka je brzini širenja svjetla, naime* $c = 300\,000$ *km/s.*[14])

141. — Na sl. 107 vidimo jedan sinusoidalni val. Ovdje *T* znači vrijeme trajanja jednog titraja. Vodoravna udaljenost između prvog ($T = 0$) i trećeg čvorišta naziva se *duljinom sinusoidalnog vala* λ. Umjesto ove udaljenosti možemo uzeti udaljenost između prvog (*T/4*, odnosno *3/4 T*) i trećeg trbuha (*5/4 T*, odnosno *7/4 T*).



Sl. 107.

Na sl. 106 označena je duljina valova, koji imaju oblik polukugle. Kako val za vrijeme *T* pođe naprijed za jednu valnu duljinu, to iz poznate jednadžbe: *put = brzina × vrijeme* dobivamo jednadžbu: $\lambda = c \cdot T$, ili pomoću jednadžbe (6).

$$\boxed{\lambda = \frac{c}{f}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (64)$$

[14]) Ova vrijednost odgovara međutim samo kod nesmetanog širenja elektromagnetskih valova, a osim toga ovisna je i o „duljini vala" (vidi odsjek 141.).

Vidimo dakle da je *frekvencija obrnuto proporcionalna duljini vala.* Duljinu vala dobivamo iz jednadžbe (64) u [km], ako je c u [km/s], a f u [Hz]. Često se duljina vala mjeri u metrima [m], pa za taj slučaj imamo:

$$\lambda_m = \frac{3 \cdot 10^8}{f_{Hz}} \quad . \quad . \quad . \quad (65)$$

Ako f izrazimo u kHz, imamo:

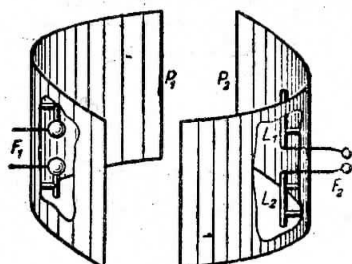
$$\lambda_m = \frac{3 \cdot 10^5}{f_{kHz}} \quad . \quad . \quad . \quad (66)$$

U radiotehnici je međutim uobičajeno računati s frekvencijom mjesto s duljinom vala.

142. — U slijedećoj tabeli vidimo pregled duljina valova, odnosno frekvencija, koje se danas upotrebljavaju u radiotehnici.

Naziv frekvencija	Područje frekvencija	Valno područje
Vrlo niske frekvencije	ispod 30 kHz	iznad 10.000 metara
Niske frekvencije	30 do 300 kHz	10.000 do 1.000 metara
Srednje frekvencije	300 do 3.000 kHz	1.000 do 100 metara
Visoke frekvencije	3.000 do 30.000 kHz	100 do 10 metara
Vrlo visoke frekvencije	30.000 kHz do 300 MHz	10 do 1 metar
Ultra-visoke frekvencije	300 do 3.000 MHz	1 m do 10 cm
Super-visoke frekvencije	3.000 do 30.000 MHz	10 cm do 1 cm
Ekstremno visoke frekvenc.	30.000 do 300.000 MHz	1 cm do 1 mm

143. — Ovdje ćemo spomenuti još i klasične pokuse, koje je godine 1887/88 izveo *H. Hertz* da dokaže *istovjetnost elektromagnetskih valova i valova svjetla, kako bi potvrdio Maxwellovu i Faradaye u* teoriju. U žarišni pravac metalnog paraboličnog zrcala P_1 (sl. 108) Hertz je postavio iskrište F_1. U udaljenosti od nekoliko metara nalazilo se isto takvo zrcalo P_2 s malim iskrištem F_2, koje je bilo spojeno s metalnim štapovima L_1 i L_2. Svi ovi dijelovi bili su od zrcala naročito dobro izolirani. Kad je preko iskrišta F_1 preskočila iskra, tada su elektromagnetski valovi, koji su uslijed toga nastali, zrcalom P_1 bili usmjereni i zrcalom P_2 koncentrirani u njegov žarišni pravac. Štapovi L_1 i L_2 su se nabili, te je na iskrištu F_2 nastala malena iskra. Postavljanjem metalnih ploča ili prizama od smole između jednog i drugog zrcala moglo se je utvrditi, da se elektromagnetski valovi, upravo kao i valovi svjetla odbijaju, odnosno lome, Najmanja duljina vala koju je Hertz upotrebljavao,



Sl.. 108

iznosila je oko 66 cm, što prema jednadžbi (66) odgovara frekvenciji približno 450 MHz. Iako sam Hertz nije ni slutio, kakvu važnost imaju njegovi pokusi, ipak ove pokuse moramo smatrati osnovom čitave radiotehnike.

Ponavljanje

Pod *valovima* razumijevamo titranje koje se širi u prostoru. *Brzina širenja* elektromagnetskih valova jednaka je brzini svjetla, dakle 300.000 km/s. *Duljina vala* λ jednaka je horizontalnoj udaljenosti između prvog i trećeg čvorišta. Frekvencija je obrnuto proporcionalna duljini vala ($f = c/\lambda$) Prema primjeni u radiotehnici duljine valova podijeljene su u nekoliko područja, pa tako imamo: duge, srednje, granične, kratke, ultra-kratke i decimetarske valove. Razglasne emisije vrše se na srednjim, dugim i kratkim valovima. *H. Hertz* je svojim klasičnim pokusima prvi puta dokazao istovjetnost elektromagnetskih valova i valova svjetla, te da se oni razlikuju međusobno samo u duljini vala.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kakva je razlika između titraja i vala? *Odgovor:* Titranje je periodično gibanje oko nekog određenog položaja mirovanja, dok je val titranje, koje se širi u prostoru. — *P.*: Kojom brzinom se šire radio-valovi? *O.*: Brzinom svjetla, dakle 300.000 km/s. — *P.*: Što je duljina vala kod jednog titraja ili vala? *O.*: Udaljenost između prvog i trećeg čvorišta. — *P.*: Kakav odnos postoji između frekvencije i duljine vala? *O.*: Obje ove veličine obrnuto su proporcionalne. — *P.*: Kakva područja valnih duljina razlikujemo? *O.*: Duge, srednje, granične, kratke, ultrakratke i decimetarske valove. — *P.*: U čemu se razlikuju ova područja? *O.*: U duljini vala, odnosno u frekvenciji. — *P.*: Kakvo je značenje Hertzovih pokusa? *O.*: Hertz je prvi pokusima potvrdio da su elektromagnetski valovi u biti isto što i valovi svjetla.

Pitanja

49. Nacrtaj električke i magnetske linije polja dipola za četiri uzastopne četvrtperiode jednog titraja!

50. Kakva je razlika između radio-valova i valova svjetla?

51. Koje se valne duljine upotrebljavaju za razglas?

Zadaci

44. Kolika je duljina vala Radiostanice Zagreb, koje je frekvencija 1133 kHz?

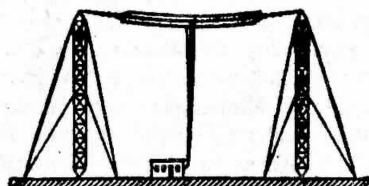
45. Koja je frekvencija televizijskog odašiljača, koji radi na valu duljine 7 metara?

46. Neki titrajni krug se sastoji od induktiviteta 0,16 mH i kapaciteta 250 pF: Na koju valnu duljinu se ovaj krug dade ugoditi?

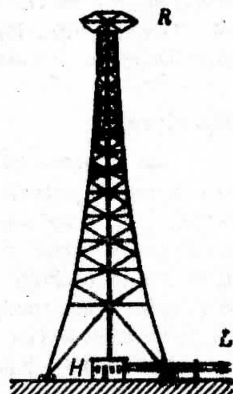
Oblici i svojstva odašiljačkih antena

144. — Osim onih antena, o kojima je dosada bilo govora, sada ćemo upoznati još neke oblike antena. Sve ove vrste antena dadu se dakako upotrijebiti ne samo za odašiljanje, nego i za primanje elektromagnetskih

valova. Pogledajmo najprije *T*-a n t e n u, koja ima v i š e ž i c a (sl. 109). Dodavanjem horizontalnih žica povećava se kapacitet antene. Gornje žice pričvršćene su preko izolatora na dva okomita stupa, a odvod sa sredine ulazi u zgradu odašiljača, gdje je spojen s odašiljačkim uređajem. Moderni odašiljači vrlo često imaju v e r t i k a l n u antenu izvedenu



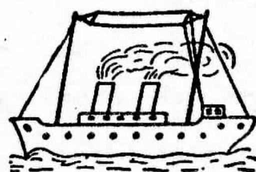
Sl. 100.



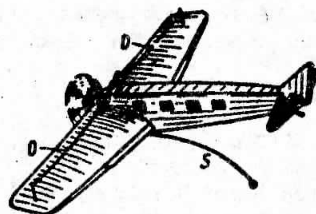
Sl. 110.

od j e d n e ž i c e (sl. 110), koja je napeta unutar drvenog stupa. Gornji kraj ove žice vezan je za veliki *metalni prsten R*, koji povećava kapacitet antene. Ovim se postiže veći doseg i smanjuje fading (vidi odsjek 158). U kućici *H* nalaze se uređaji za ugađanje (zavojnice i kondenzatori), a pojni vod *L* veže antenu s odašiljačem.

145. — Na sl. 111 vidimo b r o d s k u *L*-a n t e n u, koja ima dvije žice. Kao uzemljenje služi u ovom slučaju metalni trup broda, koji je u vezi s vodljivom morskom vodom. Sl. 112 prikazuje konačno dvije izvedbe a v i o n s k i h a n t e n a. *S* je takozvana p o v l a č n a antena, dugačka do 100 metara, koja je na donjem kraju opterećena metalnim utegom tako, da se radi struje zraka savija parabolično. *D* je *dipol-antena* napeta između dva malena stupa preko krila aviona. Ove antene upotrebljavaju se za veze na kratkim valovima. Kod povlačne antene se kao uzemljenje upotrebljavaju metalni dijelovi aviona.



Sl. 111.

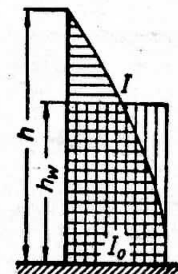


Sl. 112.

146. — Što je u z e m l j e n j e antene bolje, to manji su gubici energije. Vod za uzemljenje mora prema tome po mogućnosti dopirati do podzemne vode. Stoga se naročito na mjestima, kod kojih visina podzemne vode jako varira, upotrebljava mreža od žica, koje se od podnožja antene protežu u radijalnom smjeru pod površinom zemlje. U jednostavnijim slučajevima dobro služe

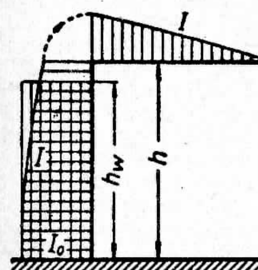
i jednostavne metalne ploče zakopane ispod razine podzemne vode. U slučajevima, kad se dobro uzemljenje ne može postaviti, upotrebljava se p r o t u t e g. On se sastoji od žica ili metalnih ploča, postavljenih pod antenom iznad površine zemlje od zemlje izolirano. Protuteg mora biti po prilici dva puta tako velik kao njegova antena.

147. — Prema odsjecima 132 do 134 i sl. 99 do sl. 101 struja i napon imaju u svakom dijelu antene različitu vrijednost. Za daljinsko djelovanje antene nije dakle mjerodavna stvarna visina, nego e f e k t i v n a v i s i n a a n t e n e h_w. *Pod efektivnom visinom antene* h_w *razumijevamo dužinu, koju bi morala imati vertikalna antena, kroz koju bi po čitavoj dužini protjecala struja* I_0, *koja bi bila jednaka struji izmjerenoj u strujnom trbuhu stvarne antene, uz uvjet, da daljinsko djelovanje ove antene bude jednako djelovanju stvarne antene.* Grafički se h_w dade odrediti iz slike, koja pokazuje raspodjelu struje po anteni. Na sl. 113 vidimo podjelu struje *I* za vertikalnu uzemljenu antenu. Nacrtajmo pravokutnik sa stranicom I_0 (jakost struje u strujnom trbuhu), i visinom tolikom da površina ovog pravokutnika bude jednaka površini, koju zatvara krivulja raspodjele struje po anteni. *Visina ovog pravokutnika* je tada jednaka *efektivnoj visini antene* h_w. Odmah vidimo da je h_w manje od *h*, i to u našem slučaju $h_w = 2h/\pi = 0{,}637\ h$. Za *T*-antenu je $h_w \approx h$, dok je za sve ostale vrste antena $h_w = 0{,}5\ h$ do *h*.

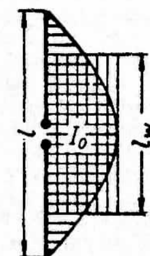


Sl. 113.

148. — Na sl. 114 vidimo, kako se određuje efektivna visina L-antene, dakle antene s velikim kapacitetom. Sinusoidalnu krivulju struje *I* nacrtajmo tako, kao da je horizontalni dio antene produžen u smjeru vertikalnog dijela. Zatim povratimo gornji dio u njegov prijašnji položaj. Efektivna visina h_w mora se odabrati tako, da površina pravokutnika sa stranicama h_w i I_0 bude jednaka površini, koju omeđuje vertikalni dio antene i odgovarajući dio sinusoide. Efektivna visina antene razlikuje se u ovom slučaju vrlo malo od stvarne visine. Za daljinsko djelovanje L-antene dolazi u obzir samo njezin vertikalni dio. Nema dakle smisla uzeti predugačak vodoravni dio, koji samo povećava kapacitet. U slučaju, da je vodoravni dio oko tri puta dulji od vertikalnog, efektivna visina približno je jednaka stvarnoj. Na sl. 115 imamo konačno određivanje efektivne duljine l_w dipol-antene, koja ima duljinu *l*. Za nju vrijedi: $l_w = 2l/\pi = 0{,}637\ l$.



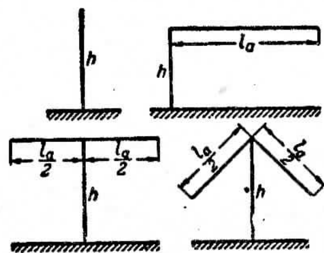
Sl. 114.



Sl. 115.

149. — Dužina *vlastitog vala* λ_a osnovnog titraja antene ovisna je o efektivnom induktivitetu L_a i efektivnom kapacitetu C_a antene. Te se

dužine izračunavaju po jednadžbama, koje su dobivene mjerenjem. Ako h označuje duljinu vertikalnog dijela (sl. 116.), l_a ukupnu duljinu horizontalnog dijela (kod antena s više horizontalnih žica uvrštava se naravno samo duljina jednog vodiča), l_l najdulji put struje (od točke uzemljenja do najudaljenijeg kraja antene), tada za vertikalnu antenu vrijedi ($l_a = 0$, $l_l = h$): $\lambda_a = 4\,h$, za L-antenu ($l_l = h + l_a$): $\lambda_a = 4{,}1$ do $4{,}5\,l_l$, za T-antenu ($l_l = h + l_a/2$): $\lambda_a = 4{,}5$ do $7\,l_l$. a za skošenu T-antenu = ($l_l = h + l_a/2$): $\lambda_a = 6$ do $8\,l_l$.



Sl. 216.

Ponavljanje

Osim antena, koje smo upoznali ranije u radiotehnici se upotrebljavaju *T*-antene i *L*-antene s više žica, kao i *vertikalni* stupovi. Kod *aviona* se naročito upotrebljavaju povlačne i dipol-antene. *Uzemljenje* antene mora biti što bolje, da gubici energije budu maleni. Ono mora biti po mogućnosti u vezi s podzemnom vodom. Ako to nije moguće, potrebno je načiniti protuteg od žica razapetih izolirano iznad površine zemlje. Za daljinsko djelovanje antene mjerodavna je efektivna visina antene h_w. Kod *T*-antena i *L*-antena, koje imaju dovoljno veliki kapacitet, efektivna visina približno je jednaka stvarnoj visini. Kod svih ostalih vrsta antena vrijednosti za h_w iznose od 0,5 h do h. Vlastita duljina vala λ_a antene dade se izračunati iz jednostavnih približnih jednadžbi. Za vertikalnu uzemljenu antenu vrijedi: $\lambda_a = 4\,h$.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kakva je svrha paralelnog spajanja većeg broja vodiča kod antene? *Odgovor:* Paralelno spajanje povećava kapacitet i doseg. — *P.*: Koje uvjete mora ispuniti dobro uzemljenje? *O.*: Mora dosizati do podzemne vode. — *P.*: Što je protuteg? *O.*: Uređaj sastavljen od većeg broja žica razapetih izolirano iznad površine zemlje. — *P.*: Što je efektivna visina antene? *O.*: Pod efektivnom visinom antene razumijevamo visinu, koju bi morala imati doknadna antena, kroz koju bi po čitavoj visini protjecala struja I_0, koja bi bila jednaka struji izmjerenoj u strujnom trbuhu stvarene antene, uz uvjet, da daljinsko djelovanje te antene bude jednako djelovanju stvarne antene. — *P.*: Kod koje vrste antena je efektivna visina približno jednaka stvarnoj visini? *O.*: Kod antena s velikim kapacitetom, dakle kod *L*-antena i *T*-antena. — *P.*: Kolika je efektivna visina vertikalne antene? *O.*: $h_w = 0{,}637\,h$. — *P.*: Kolika je duljina vlastitog vala vertikalne antene? *O.*: $\lambda_a = 4\,h$.

150. — Što je veća efektivna visina antene h_w, to više energije antena isijava. Proizvođenje i isijavanje vezano je međutim uvijek uz gubitke. Najvažniji razlozi gubitaka ili izgubljene snage N_v jesu: 1. *toplina*, koja prema poznatom Jouleovom zakonu nastaje u radnom otporu antene i antenske zavojnice. Osim toga se u metalnim predmetima u blizini antene (antenski stupovi, zatezna užeta, i t. d.) induciraju izmjenične struje, koje u ovim predmetima proizvode toplinu. Da bi se smanjili gubici, grade se antene i zavojnice od jakih pletenica, a svi metalni predmeti, koji se nalaze u blizini antene, dobro se izoliraju prema zemlji. 2. *gubici uzemljenja* uzrokovani slabom vodljivošću tla. Što je tlo bolji vodič, to kraći su putevi električkih linija u zemlju,

te se time i toplinski gubici uslijed struja, koje teku kroz zemlju, smanjuju. 3. gubici uslijed *izbijanja* uvjetovani visokim naponima na anteni i slabom izolacijom (vlažni ili zaleđeni antenski izolatori).

151. — Kod odašiljačkih antena se gubicima, o kojima je do sada bilo govora, pridružuju još i gubici uzrokovani *isijavanjem* energije, koja se od antene širi u prostor. Kako te gubitke ustvari iskorištavamo, to se prigušenje, do kojeg radi ovih gubitaka dolazi, naziva korisnim prigušenjem. Iz izvoda u koje se ovdje ne ćemo upuštati za *isijanu snagu* N_s dobivamo ovu jednostavnu jednadžbu:

$$N_s = 1579 \left(\frac{h_w}{\lambda}\right)^2 \cdot I_0^2 \ [\mathrm{W}] \quad . \quad . \quad (67)$$

Ovdje je h_w efektivna visina antene u [m], λ duljina vala isijanih titraja u [m], I_0 efektivna jakost struje u strujnom trbuhu u [A]. Vidimo dakle, da isijana snaga raste s kvadratom efektivne visine h_w i kvadratom struje I_0, ali da opada s kvadratom duljine λ. Isijana snaga ima naročito velike vrijednosti kod kratkih valova (vidi odsjek 142.), tako da se s kratkovalnim odašiljačima također i s niskim antenama i malenom jakošću struje u anteni može postići veliki doseg.

152. — Prigušenje, koje pripisujemo izgubljenom učinu, određeno je radnim otporom R_v antene. Isto tako možemo uzeti da i korisnom prigušenju, dakle isijanoj snazi, odgovara stanoviti otpor isijavanja, koji ćemo označiti s R_s. Ukupni otpor antene R_a bit će onda: $R_a = R_v + R$. Možemo odmah postaviti i jednadžbu za *otpor isisavanja*. Znamo da je radna snaga dana jednadžbom: $N = I^2 \cdot R$, pa je samo potrebno jednadžbu (67) podijeliti s I_0^2, da dobijemo traženi otpor R_s. Tako dobivamo da je:

$$R_s = 1579 \left(\frac{h_w}{\lambda}\right)^2 \ [\Omega] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (68)$$

Zbog toga, što je $h_w = 0{,}637\,h$, a $\lambda = 4\,h$, za vertikalnu uzemljenu antenu imamo $R_s = 1579 \cdot (0{,}637\,h/4\,h)^2 = 1579 \cdot 0{,}1592^2 = 40\ \Omega$. *Otpor isijavanja vertikalne uzemljene antene nije dakle ovisan o visini antene i uvijek je jednak 40 Ω!*

153. — Zbog nesigurnosti u određivanju efektivne visine h_w u jednadžbama (67) i (68) ne daje se snaga odašiljača kao isijana snaga, nego kao ukupna snaga u anteni $N_a = I_0^2 \cdot R_a = N_v + N_s$. Ima li dakle neki odašiljač antensku snagu 100 kW, onda to znači, da antena tu snagu uzima od odašiljača. Isijana snaga je znatno manja jer se dobar dio energije dovedene u antenu gubi u obliku izgubljene snage na otporu R_v, koji te gubitke karakterizira. Stvarno isijana energija iznosi samo: $N_s = N_a - N_v$. *Odnos otpora isijavanja prema ukupnom antenskom otporu naziva se stupanj djelovanja isijavanja* μ_a *antene*, pa je prema tome:

$$\mu_a = \frac{R_s}{R_a} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (69)$$

Ponavljanje

Gubici u toplini, gubici u uzemljenju i gubici na izolatorima predstavljaju za odašiljačku antenu beskorisno trošenje privredne energije. Svi ovi gubici čine prigušenje uslijed gubitaka. Stvarno *isijana energija* N_s naziva se *korisnim prigušenjem*, a proporcionalna je kvadratu efektivne visine i maksimalne jakosti struje, a obrnuto proporcionalna kvadratu duljine vala. Kao što *prigušenju* uslijed *gubitaka* odgovara otpor R_v, tako i *korisnom prigušenju* odgovara otpor isijavanja R_s. Ukupni otpor antene R_a jednak je zbroju otpora isijavanja. Otpor isijavanja vertikalne uzemljene antene neovisan je o visini antene i uvijek iznosi 40 Ω. Kao snaga odašiljača uzima se ukupna snaga privedena anteni. *Stupanj djelovanja isijavanja* kod odašiljačke antene jednak je odnosu otpora isijavanja prema ukupnom otporu antene.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Radi čega dolazi do beskorisnog prigušenja antene? *Odgovor:* Radi gubitaka u toplini, gubitaka u uzemljenju i gubitaka uslijed loše izolacije. — *P.*: Što je korisno prigušenje antene? *O.*: Mjerilo za stvarno isijanu snagu. — *P.*: O čemu ovisi ova snaga? *O.*: O kvadratu efektivne visine, maksimalne jakosti struje i duljine vala. — *P.*: U čemu se razlikuje otpor isijavanja i otpor gubitaka antene? *O*: Otpor gubitaka predstavlja izbubljenu snagu, a otpor isijavanja predstavlja korisno prigušenje antene. — *P.*: Koliki je ukupni otpor antene? *O.*: Jednak je sumi otpora gubitaka i otpora isijavanja. — *P.*: Kako se može izračunati stupanj djelovanja isijavanja antene? *O.*: Iz odnosa otpora isijavanja prema ukupnom otporu antene.

Pitanja

52. Zašto općenito stvarna visina antene nije jednaka efektivnoj visini?
53. Što razumijevamo pod vlastitim valom antene?
54. Koliki je otpor isijavanja vertikalne uzemljene antene?
55. Koliki je ukupni učin odašiljačke antene?

Zadaci

47. Horizontalni dio 50 m visoke *T*-antene, od osno *L*-antene, dugačak je 150 m. Koliki je u jednom i u drugom slučaju vlastiti val antene?

48. Kolika mora biti jakost struje u strujnom trbuhu odašiljačke antene, koja ima efektivnu visinu 20 m, ako isijana snaga kod duljine vala od 400 m mora biti 200 W?

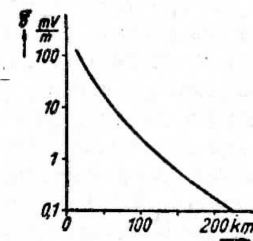
49. Odašiljačka antena ima efektivnu visinu 44 m, vlastiti val 440 m i ukupni otpor 25 Ω. U strujnom trbuhu jakost struje iznosi 10 A; a) koliki je otpor isijavanja, b) isijana snaga, c) ukupna snaga u anteni, d) stupanj djelovanja isijavanja?

Širenje elektromagnetskih valova

154. — Iz odsjeka 139 i sl. 106. znamo da se elektromagnetski valovi uzemljene antene šire uz površinu zemlje u obliku polukugle, a da električke silnice stoje pri tome praktički okomito na površinu zemlje. To se međutim dešava jedino u slučaju, ako je površina zemlje vodljiva (voda, vlažno tlo), te ako širenje valova ne priječe zapreke kao što su zgrade, šume, brda, i t. d. U kamenitom i pjeskovitom tlu zbog malene vodljivosti nastaju veliki gubici

energije, pa u tom slučaju silnice nisu više okomite na površinu zemlje. Energija polja opada s udaljenošću odašiljača. Kako su pokazala mnogobrojna mjerenja i računi, i za ovo opadanje energije polja, isto kao i za prigušenje električkih titraja, vrijedi eksponencijalni zakon.

Za *jakost električkog polja* $\mathfrak{E}$ u [V/m], vrijedi približno za udaljenosti do 2000 km) *Austinova jednadžba:*

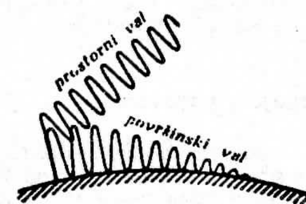


Sl. 117.

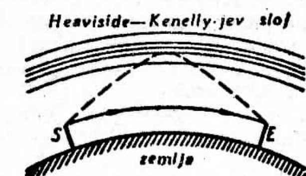
$$\mathfrak{E} = 120\pi \cdot \frac{h_w \cdot I_0}{\lambda \cdot r} \cdot e^{-\frac{w \cdot r}{\sqrt{\lambda}}} \quad . \quad . \quad . \quad (70)$$

Tu je h_w efektivna visina antene u [m], I_0 jakost struje u strujnom trbuhu antene u [A], *e* baza prirodnih logaritama = 2,718 a *w* faktor ovisan o sastavu tla (za *morsku vodu* $w \approx 0{,}000004$, za *ravnice* $w \approx 0{,}00035$, za *suho pjeskovito tlo* $w \approx 0{,}00095$ a za *gradsko izgrađeno zemljište* $w \approx 0{,}0022$). Na sl. 117. vidimo jednadžbu (70) prikazanu grafički. Gubici uzrokovani površinom tla najmanji su kod dugih valova. To se vidi i iz jednadžbe (70), jer s porastom duljine vala i negativni eksponent ove jednadžbe postaje manji, a uslijed toga vrijednost izraza uz *e* veća. Ova vrijednost će rasti brže, nego što pada vrijednost razlomka uz *e* s porastom duljine vala. Radi ove činjenice su se u prvim danima radiotehnike za prekooceanski promet upotrebljavali samo dugi valovi. Danas međutim znademo, da se i s k r a t k i m valovima uz neznatnu snagu dade postići nevjerovatno velik doseg (vidi odsjek 159,).

155. — Valovi, koji u svome širenju slijede zakrivljenost zemlje, nazivaju se p o v r š i n s k i m valovima (sl. 118.). Jedan dio energije, što je antena isijava, širi se međutim na sve strane u prostor u obliku p r o s t o r n i h valova (sl. 118.). Vanredno veliki doseg elektromagnetskih valova, naročito kratkih, doveo je do zaključka, da se prostorni valovi odbijaju na vodljivom sloju, koji se nalazi u visini od kojih 100 km iznad površine zemlje. Ovaj sloj (sl. 119.) naziva se po svom pronalazaču *Heaviside-Kenellyjev* sloj (izgovori: Hevisajd). Ovaj sloj se sastoji od „oblaka" iona (nabijenih atoma plina) i negativnih elektrona, koji se stvaraju u gornjim slojevima atmosfere djelovanjem sunčanih zraka (naročito ultravioletnog dijela) i kozmičkih isijavanja. Heaviside-Kenellyjev sloj naziva se često i *ionosferom*.



Sl. 118.



Sl. 119.

Kako ionizacija raste s visinom do neke najviše vrijednosti, a zatim opada, to ionizirani sloj nema oštrih granica. Na sl. 119. ovo je označeno tako, da je ionizirani sloj prikazan s nekoliko kružnih lukova. Jakost ionizacije ovisna

je i o dobi dana, pa je u podnevnim satovima najjača, a nakon zalaska sunca se smanjuje, jer dolazi do spajanja iona. Prema današnjem mišljenju u visini od 100 do 500 km iznad površine zemlje postoji više ovakvih slojeva.

156. — Kako vidimo na sl. 119; iz odašiljačke antene *S* isijani valovi dolaze na prijemnu antenu *E* kao površinski i kao prostorni valovi. Ako su antene *S* i *E* jedna od druge vrlo daleko, dolazit će do prijemne antene *E* još samo prostorni valozi odbijeni od Heaviside-Kenellyjeva sloja, jer će površinski valovi biti oslabljeni gubicima u tlu. Zbog jače ionizacije i tromosti iona po danu će se prostorni valovi strmije odbijati, nego po noći. Radi toga će oni prije doći natrag na površinu zemlje, pa doseg po danu ne će biti tako velik kao po noći. Refleksija prostornih valova bit će osim toga ovisna i o kutu, pod kojim se valovi isijavaju, i o duljini vala. Kako je Heaviside-Kenellyjev sloj podvrgnut promjenama, naročito u doba izlaženja i zalaženja sunca, bit će refleksija u to doba sad jača, sad slabija. Na svojstva i visinu Heaviside-Kenellyjeva sloja utječe osim svega toga i godišnja doba i sunčane pjege.

Ponavljanje

Energija, koju isijava odašiljačka antena, gubi se prilikom širenja više ili manje, već prema svojstvima tla, preko kojeg prelaze elektromagnetski valovi. Jakost polja u stanovitoj udaljenosti od odašiljačke antene dade se približno odrediti *Austinovom jednadžbom*. Gubici energije najmanji su kod dugih valova; no i kod kratkih valova dade se postići vrlo veliki doseg. Površinski valovi imaju relativno malen doseg, dok je kod *prostornih* valova doseg velik. Prostorni valovi odbijaju se naime od *Heaviside-Kenellyjevog* sloja, koji se nalazi iznad površine zemlje. Taj sloj je sastavljen od iona i elektrona, i ima različita svojstva već prema dobi dana i godine, pa se i doseg prostornih valova s tim u vezi mijenja.

Pitanja i odgovori

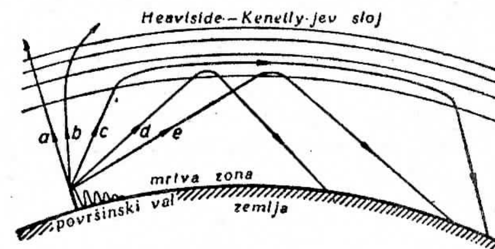
Pitanje: Što utječe na širenje elektromagnetskih valova? *Odgovor:* Svojstva tla. — *P.*: Kad se valovi šire bez slabljenja, a kad bivaju jako oslabljeni? *O.*: Bez slabljenja se šire iznad vode i vlažnog tla, a stjenovito i pjeskovito tlo ih slabi isto kao i zgrade, drveće, bregovi i t. d. — *P.*: Kako se može izračunati jakost električkog polja na nekom mjestu? *O.*: Austinovom jednadžbom. — *P.*: Kako se šire površinski valovi? *O.*: Uz površinu zemlje. Njihov doseg je zbog gubitaka u tlu dosta malen. — *P.* Kako se šire prostorni valovi? *O.*: Njih antena isijava u prostor, a Heaviside-Kenellyjev sloj ih odbija k zemlji, pa uslijed toga imaju mnogo veći doseg. — *P.*: Kako nastaje Heaviside-Kenellyjev sloj? *O.*: Ionizacijom gornjih slojeva atmosfere djelovanjem sunčevih i visinskih zraka. — *P.*: Da li Heavisiee-Kenellyjev sloj djeluje uvijek jednako? *O.*: Ne, on je podvrgnut promjenama ovisnim o dobi dana i godine, i o sunčevim pjegama. Uslijed toga nije ni doseg prostornih valova uvijek jednak.

157. — Ako prijemna antena *E* na sl. 119 u isto vrijeme prima površinske i prostorne valove, može se desiti, da zbog različite duljine puta ova dva vala dođu do prijemne antene s faznom razlikom od polovine periode, dakle polovine duljine vala, ili n e p a r n i m višekratnikom te duljine, U slučaju da su amplitude tih dvaju valova jednake, onda se njihova djelovanja poništavaju, a ako su amplitude različite, dolazi samo do slabljenja djelovanja. Uz

faznu razliku manju od polovine duljine vala, može doći i do pojačavanja djelovanja. Ako razlike u fazi nema, ili ako je ta razlika jednaka duljini vala, tada se amplitude obaju valova zbrajaju, pa je njihovo djelovanje najjače. Iz ovoga slijedi da će prijem biti podvrgnut izobličenju i promjenama u jakosti glasa, pa da jakost glasa može pasti čak i na nulu. Ove pojave poznate su svim slušaocima radio-emisija pod imenom *fedi g'a* (od engleskog: fading = nestajanje).

158. — Budući da je na manjim udaljenostima od odašiljača prostorni i površinski val približno jednake jakosti, možemo u krugu od 50 do 100 km primati emisije samo s jakim promjenama u jakosti glasa. Ta zona podvrgnuta je takozvanom *blizom fedingu*, koji se pojavljuje uglavnom za m r a k a, jer se tada prostorni valovi zbog veće množine elektrona u Heaviside-Kenellyjevom sloju vrlo dobro šire. Ova pojava dade se ublažiti, odnosno premjestiti na veću udaljenost od odašiljača, posebnim oblicima antene; potrebno je naime što više smanjiti isijavanje u prostor („strmo" isijavanje). To se može postići, na primjer, antenom u obliku stupa s kapacitetom na vrhu, kao na sl. 110.; često se za to upotrebljavaju i antifeding-dipoli. *Udaljeni fedi g*, dakle feding koji nastupa u većim udaljenostima od odašiljača, može se djelomično pripisati također superpoziciji prostornih i površinskih valova. Na vrlo velikim udaljenostima intenzitet je površinskog vala neznatan prema intenzitetu prostornog vala. No usprkos tomu može doći do fedinga, koji je u ovom slučaju uvjetovan promjenama uvjeta širenja ili međusobnim utjecajima više prostornih valova (na primjer odbijanjem od dva sloja ionosfere, koji se nalaze na različitim visinama). Kasnije, kad bude govora o prijemnicima, vidjet ćemo, što se sve poduzima da se smetnje od fedinga svedu na najmanju mjeru.

159. — Širenje valova znatno ovisi o duljini vala. Ako je duljina vala dovoljno malena, tada valovi, koji na Heaviside-Kenellyjev sloj upadaju o k o m i t o (*a* na sl. 120), prolaze kroz taj sloj i ne dospijevaju na zemlju. Kratki valovi, koji do sloja dolaze pod manjim kutom, (*b*, na sl. 120), lome se u Heaviside-Kenellyjevom sloju isto onako, kao i zrake svjetla, kad prelaze iz jedne tvari u drugu, te također ne dolaze natrag. Prekoračimo li određenu duljinu vala, *graničnu duljinu*, koja ovisi o jakosti ionizacije Heaviside-Kenellyjeva sloja i kutu upadanja, dolazi do refleksije (što je kut upadanja manji to je manja granična duljina vala). Prema tome srednji i kratki valovi *d* i *e*, koji u sloj upadaju pod malim kutom, prodiru u Heaviside-Kenellyjev sloj samo neznatno i od njega se odbijaju. Radi toga ovi valovi imaju velik doseg. To vrijedi naročito za kratki prostorni val *c*, koji uz određeni kut upadanja prevaljuje vrlo veliki put u z d u ž Heaviside-Kenellyjeva sloja, šireći se pritome skoro bez gubitaka, te se tek nakon toga dugog puta vraća na zemlju. (Austi-



Sl. 120.

nova jednadžba daje kod kratkih valova približne rezultate i za vrlo velike udaljenosti, ako se izostavi eksponencijalni dio). Uz stanovite uvjete može se dogoditi, da prostorni valovi unutar Heaviside-Kenellyjeva sloja jednom ili više puta obiđu Zemlju, prije nego se na nju reflektiraju. Budući da je brzina širenja elektromagnetskog vala 300.000 km/s, a opseg Zemlje iznosi 40.000 km, signal prispijeva po prilici nakon 1/7 s ili cijelog mnogokratnika od toga na mjesto, s kojeg je bio otposlan („radio-jeka"). Vrlo d u g i valovi šire se naprotiv uz površinu zemlje kao površinski valovi, a pri tome njihova energija opada lagano s udaljenošću (vidi odsjek 154). To je razlog da se još i danas za telegrafski saobraćaj između Evrope i Amerike upotrebljavaju valne duljine od 14.000 m kao zamjena za inače mnogo zgodnije kratkovalne veze.

160. — Između odašiljača i prijemnika postoji prostor, na kojem nema ni površinskih ni prostornih valova, te prema tome nema ni prijema. Taj se prostor naziva *mrtva zona* (sl. 120). Dalje od te zone može se međutim odašiljač opet vrlo dobro čuti. Kako je doseg ovisan o doba dana, to se za velike dosege upotrebljavaju različite duljine vala. Odbijanje od Heaviside-Kenellyjeva sloja po danu je kod kratkih valova slabije, nego kod dugih, pa zato po danu kratki valovi imaju veći doseg. To je razlog da se kao d a n j a valna duljina za prekooceanske veze uzima oko 20 m, a za noć područje od 40 do 50 m. Za veze preko kopna upotrebljavaju se po danu valne duljine oko 40 m, a po noći oko 80 m. O ostalim svojstvima kratkih, a naročito ultrakratkih valova, kasnije ćemo govoriti opširnije.

Ponavljanje

Superpozicijom površinskih valova i prostornih valova, koji se reflektiraju od Heaviside-Kenellyjeva sloja, nastaje *feding*. On se kod prijema očituje promjenama u jakosti glasa i izobličenjem. Razlikujemo *bliži* i *udaljeni* feding. Pojava fedinga dade se sa strane odašiljača umanjiti upotrebom posebnih antena, a sa strane prijemnika posebnim spojevima. Prostorni valovi se odbijaju od Heaviside-Kenellyjeva sloja i reflektiraju na zemlju. Refleksija je ovisna o kutu, pod kojim valovi upadaju na sloj, i o duljini vala. Kratki valovi mogu uzduž Heaviside-Kenellyjeva sloja prevaliti vrlo velike udaljenosti, pa se tek onda reflektiraju na zemlju; odatle veliki doseg kod kratkih valova. U *mrtvoj zoni* prijem nije moguć, jer nema ni prostornih ni površinskih valova.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Uslijed čega nastaje feding? *Odgovor:* Uslijed istovremenog dolaska prostornih i površinskih valova do prijemne antene. — *P.*: Kad je feding najjači? *O.*: Kad je fazna razlika između prostornog i površinskog vala jednaka polovici duljine vala ili njegovom neparnom višekratniku — *P.*: Što je bliži feding? *O.*: Pojava, da u bližoj okolini jakog odašiljača dolazi do promjena u jakosti glasa, što je posljedica gotovo jednake jakosti prostornog i površinskog vala na tom mjestu — *P.*: Kako dolazi do udaljenog fedinga? *O.*: S jedne strane kao i do blizog fedinga, superpozicijom površinskih i prostornih valova, a s druge strane uslijed promjena ionosfere i međusobnog djelovanja prostornih valova u ionosferi. — *P.*: Čime se objašnjava veliki doseg kratkih valova? *O.*: Uz stanoviti kut upadanja kratki valovi prevaljuju duge putove uzduž Heaviside-Kenellyjeva sloja gotovo bez gubitaka, i tek nakon toga se reflektiraju na zemlju. — *P.*: Što razumijevamo pod graničnom duljinom vala? *O.*: To je duljina vala, iznad koje dolazi do refleksije na Heaviside-Kenellyjevu sloju i do mogućnosti, da doseg bude vrlo velik. — *P*: O čemu je ovisna granična duljina vala? *O.*: O jakosti ionizacije Heaviside-Kenellyjeva sloja i o kutu, pod kojim valovi u taj sloj upadaju. — *P.*: Gdje se nalazi mrtva zona? *O.*: U području, u kojem nema ni prostornih ni površinskih valova.

Pitanja

56. Vrijedi li Austinova jednadžba približno točno za sve udaljenosti?
57. Čime se mogu umanjiti pojave fedinga?
58. Kako se mogu u svako doba dana i godine na svakom mjestu zemlje osigurati radio-veze?

Zadaci

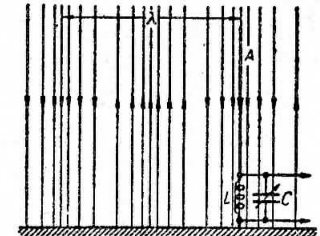
50. Efektivna visina antene odašiljača, koji radi na 400 m, iznosi 50 m, a jakost struje u strujnom trbuhu antene 60 A. Kolika je jakost električkog polja površinskog vala u udaljenosti 100 km, ako je faktor, koji određuje gubitke tla, $w = 0{,}00035$?

51. Kratkovalni odašiljač radi na valnoj duljini 40 m s antenom efektivne visine 10 m. Kolika mora biti jakost struje u strujnom trbuhu antene, ako jakost polja u udaljenosti 10.000 km mora u najboljem slučaju iznositi 5 μV/m?

II. Prijem visokofrekventnih titraja (bez elektronskih cijevi)

Prijemne antene

161. — Svaka uzbuđena odašiljačka antena isijava elektromagnetske valove. U prvom smo se odsjeku upoznali s isijavanjem i širenjem ovih valova i s osnovnim oblicima antena. Sada bismo mogli postaviti pitanje, kako se elektromagnetski valovi mogu primati i učiniti primjetljivim? Da odgovorimo na ovo pitanje, moramo se sjetiti da se izmjenično polje, što ga antena stvara, sastoji od magnetskog i električkog polja. Postavimo li, dakle, u takvo polje *prijemnu antenu*, to će električko i magnetsko polje zbog njezinog induktivnog i kapacitivnog djelovanja inducirati u njoj napone, pa će u anteni teći izmjenične struje.



Sl. 121.

162. — Da shvatimo proces, koji se odvija u prijemnoj anteni, promatrajmo najprije izmjenično električko polje. Prema odsjeku 154 silnice električkog polja, u dovoljno velikoj udaljenosti od odašiljača, praktički su okomite na površinu zemlje. Postavimo li u polje, na primjer, vertikalnu prijemnu antenu A (sl. 121), tada će na krajevima antene zbog napetog stanja u okolnom prostoru u smjeru električkih silnica nastati visokofrekventni napon U. Prema sl. 96 možemo zamisliti da se prijemna antena A nalazi između ploča jednog velikog kondenzatora. Izmjenični napon U uzrokovat će struju, koja će teći kroz antenu, a isto tako i kroz „zavojnicu za vezu" L, pa će na krajevima te zavojnice nastati stanoviti izmjenični napon. Iz onoga, što smo dosada rekli, možemo odmah zaključiti, da će izmjenični napon U biti to viši, što je veća jakost polja na mjestu prijema $\mathfrak{E}$ u [V/m] i što je veća efektivna visina prijemne antene h_w u [m]. Iz toga dobivamo jednadžbu:

$$U = \mathfrak{E} \cdot h_w \text{ [V]} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (71)$$

Približna vrijednost jakosti električkog polja $\mathfrak{E}$ može se izračunati prema jednadžbi (70).

163. — Visokofrekventni izmjenični napon U na prijemnoj anteni može se znatno povisiti, ako je antena *ugođena* na frekvenciju, odnosno duljinu vala koji primamo. Stoga je potrebno vlastitu frekvenciju prijemne antene dovesti u *rezonanciju* s frekvencijom primanog signala. Ugađanje možemo postići zgodnim izborom duljine antene, jer je prema jednadžbi (54) $f = 1/2\pi\sqrt{(L_a + L) \cdot C_a}$. Ovdje je f frekvencija signala, koji primamo, L_a efektivni induktivitet, C_a efektivni kapacitet, a L induktivitet zavojnice spojen u seriju s L_a (sl. 121). Tek ugađanjem antene moguće je izdvojiti željeni val iz mnoštva valova, koje istovremeno primamo. Možemo međutim ukopčati u antenu i potpuni titrajni krug, sastavljen od L i C, i onda ga promjenljivim kondenzatorom C ugoditi na željenu frekvenciju. Rezonantni napon, koji nastaje na L i C, dovodimo na priključnice za antenu i zemlju na prijemniku, gdje se pojačava i konačno pretvara u signal, koji možemo primijetiti. Ovdje napominjemo, da je za dobar prijem (srednja jakost glasa u sobi) potrebno imati slijedeće napone na ulazu u prijemnik: Za prijemnik s jednom elektronkom i jednim titrajnim krugom 0,1 do 0,8 mV, za prijemnik s tri elektronke i dva titrajna kruga 15 do 100 μV, za prijemnik s tri elektronke i četiri kruga 30 do 50 μV, za super s tri elektronke 10 do 50 μV, a za super s pet elektronki 0,5 do 5 μV.

164. — Budući da signali, koji dolaze do prijemne antene, pobuđuju antenu na titranje, to će i ona, kao i svaka odašiljačka antena, stvarati elektromagnetske valove. Prema tome jedan dio primljene energije antena odaje dalje; uslijed toga dolazi do izobličenja i slabljenja polja u okolini prijemne antene. P r e d prijemnom antenom je električko polje vala, koji dolazi, pojačano, a i z a antene oslabljeno („zasjenjivanje"). Jakost struje, koja teče u prijemnoj anteni ovisna je, kao i kod odašiljačke antene, o *otporu isijavanja* R_s i otporu R_a, pa je:

$$I = \frac{U}{R_a + R_s} \qquad \text{. . . . . (72)}$$

R_a je otpor, koji se sastoji od o t p o r a g u b i t a k a R_v i k o r i s n o g o t p o r a R_n ugođenog titrajnog kruga na ulazu u prijemnik, te je $R_a = R_v + R_n$. N a j v e ć i ulazni napon U imat ćemo za $R_a = R_s$, jer će u tom slučaju upravo p o l o v i n a primljene energije biti predana prijemniku, a druga polovina će biti isijana.

Ponavljanje

Nalazi li se prijemna antena u elektromagnetskom izmjeničnom polju, inducirat će se u njoj izmjenični napon, koji je proporcionalan jakosti elekričkog polja i efektivnoj visini antene: $U = \mathfrak{E} \cdot h_w$ [V]. *Ugađanjem* prijemne antene na frekvenciju titraja, koje se prima, može se taj napon znatno povisiti. Tim istim postupkom mogu se *odjeljivati* razni valovi, koji dolaze do prijemne antene. Svaka prijemna antena isijava dio primljene energije, a preostali dio dovodi prijemniku. Ako je otpor isijavanja prijemne antene jednak vodljivom otporu (R_a), tada se isijava polovina primljene energije.

Pitanja i odgovori

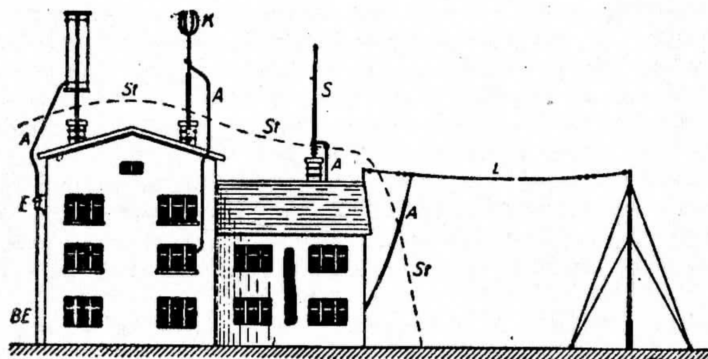
Pitanje: Kojem je djelovanju podvrgnuta prijemna antena u elektromagnetskom polju? *Odgovor*: Izmjenično električko i magnetsko polje inducira u prijemnoj anteni napone. — *P.*: Koliki je izmjenični napon induciran u prijemnoj anteni? *O.*: On je proporcionalan jakosti električkog polja i efektivnoj visini antene: $U = \mathfrak{E} \cdot h_w$ [V]. *P.* Čime se dade povisiti inducirani izmjenični napon? *O.*: Ugađanjem prijemne antene na frekvenciju titraja, koje se prima. — *P.*: Kako se može izvršiti ovo ugađanje? *O.*: Mijenjanjem duljine antene i titrajnim krugom spojenim u antenu. — *P.*: Što se još postizava ugađanjem? *O.*: Odjeljivanje valova, koje antena prima. *P.*: U čemu se prijemna antena ponaša kao odašiljačka? *O.*: Svaka prijemna antena isijava dio primljene energije opet u prostor. — *P.*: Kolika je u najboljem slučaju energija privedena prijemniku? *O.*: Jednaka je polovini ukupne energije, koju je antena primila.

165. — Upoznat ćemo se sada s n a j v a ž n i j i m o b l i c i m a p r i j e m n i h a n t e n a ne uzimajući pri tome u obzir specijalne antene za prijem kratkih i ultrakratkih valova. O njima će biti govora kasnije. Kod prijemnih antena možemo razlikovati vanjske, sobne, pomoćne i okvirne antene. Prema starom i poznatom iskustvu, *da je dobra vanjska antena najbolje visokofrekventno pojačalo*, dobra v a n j s k a antena daje najbolje prijemne rezultate. Što je efektivna visina vanjske antene veća, to će više energije ona primiti iz prostora, te će mjesne smetnje, uzrokovane raznim električkim uređajima, tramvajima, vodovima jake struje i slično, manje dolaziti do izražaja. Dobra vanjska antena je dakle u isto vrijeme i *odlično sredstvo za otklanjanje smetnji*. Dobra antena ne smije kod modernih prijemnika biti ni predugačka ni prekratka, pa joj duljina (uključivši i dovod) smije biti 15 do 25 metara.

166. — Antena, koja se često upotrebljava, je *L-antena* (sl. 122). Ona je načinjena od horizontalnih žica napetih između dvije uporišne točke, od kojih je dobro izolirana, te od dovoda, koji s jednog kraja antene ide na prijemnik. Kao uporišne točke mogu poslužiti dimnjaci, stabla ili posebni štapovi. Ako se zbog prostora ne može povući dovoljno dugačka antena, može se njezin kapacitet povećati tako, da se u horizontalnom dijelu umjesto jedne žice uzmu dvije (sl. 111). Za prijemnike je dosta da se uzmu d v i j e paralelne žice. Antena s dvije žice bolja je od antene s jednom žicom samo onda, ako su paralelne žice međusobno udaljene najmanje 1,5 m. Isto vrijedi i za *T-antenu*; kod nje odvod mora biti točno u s r e d i n i horizontalnog dijela, jer inače dolazi do nepovoljne razdiobe struje u anteni.

167. — Naročite prednosti u velikim gradovima pruža vertikalna *štapna* antena. Na sl. 122 prikazana je crtkanom linijom *St* približna visina prostora u kojem vladaju smetnje. Taj prostor možemo smatrati ispunjenim o b l a k o m

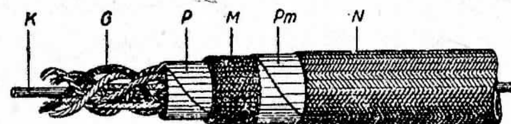
s m e t n j i, koje potječu od električkih motora, medicinskih uređaja, automatskih uklopaca, tramvaja i dr., i znatno ometaju prijem. Vanjska antena mora se prema tome nalaziti što više iznad krovova, a prema tome i iznad tog



Sl. 122.

oblaka smetnji, kako bi primljeni dio smetnji bio što manji. Za normalan prijem dovoljno je da ta visina bude 5 do 8 m, po prilici onako, kako je to prikazano na sl. 122. Tu vidimo *košarastu štap-antenu K, čeličnu cijevnu štap-antenu S i mrežastu štap-antenu R.*

168. — Dizanje antene iznad oblaka smetnji malo koristi, ako se a n t e n s k i d o v o d nalazi u polju smetnji, te ih prima. Stoga dovod mora biti *oklopljen metalom,* a oklop treba uzemljiti. Na sl. 122 takvi dovodi označeni su s *A.* Na sl. 123 vidimo kako izgleda jedan ovakav oklopljeni antenski kabel. Posrebreni bakreni vodič *K* okružen je pletivom *G* od izolacionog materijala, izolacijom *P* od impregniranog papira i gumenim omotačem *M.* Iznad gumenog omotača nalazi se metalizirani papir P_m, a iznad njega nepropusna zaštitna mreža *N.* Budući da bakarni vodič, koji u isto vrijeme predstavlja dovod od antene, tvori s metalnim oklopom kondenzator paralelan ulaznom krugu prijemnika, bit će dio visokofrekventne energije preko toga kapaciteta odveden u zemlju, pa će jakost signala, što ga antena s ovakvim oklopljenim dovodom može dovesti, biti nešto manja od antene s običnim dovodom. Kod dovoljno visokih antena i prilično osjetljivog prijemnika ova mana nije tako velika, ako se uzme u obzir, kolika je prednost imati prijem bez smetnji.



Sl. 123.

169. — *Sobnu antenu* lakše je postaviti i uzdržavati, nego vanjsku antenu. No zato je njezina efektivna visina (naročito u nižim katovima) vrlo malena (p r o s j e č n o samo oko 30 cm), a izloženost smetnjama vrlo velika.

To je konačno i razumljivo, jer sobna antena leži u neposrednoj blizini električkih vodova, plinskih cijevi, željeznih nosača, i t. d., a sve to dobro vodi i isijava smetnje. Za sobnu antenu dolazi u obzir 15 do 25 m dugačka žica položena izolirano po zidu, od zida i stropa udaljena oko 30 cm. Postoje međutim i takozvane *pojasne antene,* koje se mogu jednostavno nalijepiti ili pribiti na zid. S takvim antenama mogu se postići dosta dobri rezultati, ali je kvaliteta prijema jako ovisna o mjesnim prilikama.

170. — Manje se mogu preporučiti *pomoćne antene,* kao na primjer žice električkog zvonca, cijevi za plin ili centralno grijanje, metalni dijelovi kreveta ili klavira, i t. d. Postoje i uređaji, koji omogućuju iskorišćivanje električke rasvjetne mreže kao antene. Pri tome se neuzemljeni pol rasvjetnog voda priključuje na antensku priključnicu prijemnika *preko čvrstog kondenzatora od kojih 1000 pF, koji ima dovoljno visok ispitni napon.* U mnogim je prijemnicima ugrađen takav uređaj. Njegovu upotrebu možemo međutim preporučiti samo u slučaju n u ž d e, jer je baš rasvjetna mreža jedan od najjačih izvora smetnji a osim toga djeluje vrlo loše i na selektivnost prijema.

Ponavljanje

Za nesmetan i dobar prijem najbolje su *vanjske antene* (na primjer T-antene ili L antene, s jednom ili dvije žice, štap-antene, i t d.). Antena se mora nalaziti izvan *oblaka smetnji,* koje uzrokuju električki aparati. Antenski odvod, koji prolazi kroz takav oblak smetnji, mora biti *oklopljen metalom,* mora dakle biti upotrebljen antenski oklopljeni kabel. *Sobne antene* nisu tako osjetljive, a osim toga su smetnjama izložene mnogo jače, nego vanjske antene. U još većoj mjeri to vrijedi za *pomoćne antene.*

Pitanja i odgovori

Pitanje: Koje osnovne oblike prijemnih antena poznajemo? *Odgovor*: Vanjske, sobne, pomoćne i okvirne antene. — *P.*: Koji su najvažniji oblici vanjskih antena? *O.*: *L*-antena ili *T*-antena s jednom ili dvije žice, čelični štap, košarasta antena, krletkasta antena. — *P.*: Kako se može osigurati prijem bez smetnji? *O.*: Tako, da se vanjska antena postavi izvan oblaka smetnji. — *P.*: Što razumijevamo pod oblakom smetnji? *O.*: Područje, u kojem je jako djelovanje smetnji, koje isijavaju električki uređaji. — *P.*: Kad antenski dovod mora biti oklopljen? *O.*: Kad prolazi kroz oblak smetnji. — *P.*: Koje još vrste antena dolaze u obzir za prijem? *O.*: Sobna antena i pomoćne antene. — *P.*: Koje su mane takvih antena? *O.*: Zbog manje efektivne visine one nisu tako osjetljive kao vanjske antene, a osim toga su mnogo jače izložene smetnjama, jer se nalaze upravo u oblaku smetnji.

Pitanja

59. Koja je svrha ugađanja prijemne antene?
60. Zašto prijemna antena također isijava titraje, i koja je loša strana te pojave?
61. Na što treba paziti kod gradnje vanjskih antena?

Zadaci

52. Vertikalna štap-antena ima efektivnu visinu 5 m. Kolika mora biti jakost električkog polja, ako na anteni mora postojati napon od 75 μV?

53. Antena efektivne visine 8 m nalazi se u polju jakosti 0,2 mV/m. Koliki mora biti vodljivi otpor antene, ako maksimalna antenska struja smije iznositi 16 μA?

54. Neka antena je sagrađena od žice promjera 0,5 mm s prelomnom čvrstoćom 180 kg/mm². Kako jako se smije nategnuti, ako je faktor sigurnosti 4?

Uzemljavanje i zaštita od groma kod prijemnih antena

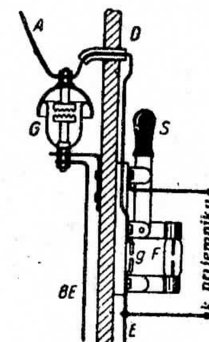
171. — Vrijednost prijemne antene ne ovisi samo o tome, kako je antena postavljena, nego i o tome, kakvo je uzemljenje. Da bi se smanjili gubici energije, otpor *uzemljenja* mora biti što manji; to znači da promjer žice, kojom se uzemljenje vrši, mora biti najmanje 2,5 mm veći zbog mehaničke čvrstoće. Za uzemljenje dolazi u obzir gola ili izolirana žica, koju treba najkraćim putem dovesti do točke uzemljenja (na primjer metalna cijev zabijena u zemlju, vodovod, uzemljeno centralno grijanje, i t. d.). Što je uzemljenje bolje, to će manje smetnji doći do prijemnika. Ako ne možemo izvesti dobro uzemljenje, ili ako postoji opasnost od jakih lokalnih smetnji, možemo umjesto uzemljenja uzeti *protuuteg*. Protuuteg za prijemnike može se izvesti tako, da se na pod uz krajeve sobe, ili pod sag položi izolirana žica, koja se zatvori u krug.

172. — Kad imamo vanjsku antenu, postoji opasnost da se ona za oluje, tuče ili slično, električki nabije tako jako, da dolazi do izbijanja u obliku iskre ili čak do udarca munje. Prema propisima mora svaka vanjska antena biti osigurana *uređajem za odvođenje groma i prenapona*. Uzemljenje, koje je za tu svrhu potrebno, mora (za razliku od uzemljenja prijemnika) biti vođeno što dalje od zgrade i najkraćim putom do mjesta uzemljenja, a žica, koja za tu svrhu služi, mora imati *prjesek najmanje dva puta veći od prjeseka antenske žice* (*BE* na sl. 122 i 124). Kao vodič može se upotrebiti pocinčana željezna žica promjera 3 mm, dok za uzemljenje i ovdje može poslužiti vodovodna mreža ili uzemljene cijevi centralnog grijanja.

173. — Prema propisima svaka antena, osim toga, mora imati i uređaje, koji svaki škodljivi prenapon automatski odvode u zemlju. Takvi uređaji moraju reagirati već na napone od 350 V, a mogu se postaviti u zgradi ili izvan nje, ali u svakom slučaju u dovoljnoj udaljenosti od lako zapaljivih predmeta. Osim toga u blizini mjesta, na kojem dovod od antene ulazi u zgradu moramo imati i posebni *uklopac za uzemljenje*, kojim se u slučaju oluje antena spaja s uzemljenjem, koje služi za zaštitu od groma, a istodobno se prekida veza između antene i prijemnika.

174. — Za zaštitu od previsokih napona služe *iskrišta* i male *tinjalice*. Grubo iskrište (*G* i *g* na sl. 124) sastoji se od dva komada nazubljenog lima (djelovanje šiljaka po zakonu influencije) s međusobnim razmakom

nazubljenih krajeva oko 0,1 mm, a služi za odvođenje velikih naboja. Osjetljivije je fino iskrište (*F* na sl. 124), koje se sastoji od dva metalna šiljka smještena u staklenu cijev s razrijeđenim zrakom. Najefikasnija je međutim tinjalica, koja služi za fino osiguranje. Ona se sastoji također od dva metalna štapa smještena u staklenu cijev, ali je ova napunjena plemenitim plinom malenog tlaka. Već kod napona na anteni, koji iznose 70 do 100 V, nastaje tinjavo ispražnjivanje, tako da je antena kratko spojena sa zemljom, pa se naboj odvodi u zemlju. Tinjalica se osim toga odlikuje vrlo malenim kapacitetom te prema tome uzrokuje i vrlo malene visokofrekventne gubitke. Na sl. 124 vidimo jedan kompletan uređaj za zaštitu od groma i od prenapona. Tu je *A* vanjska antena, *BE* vod za uzemljenje uređaja za zaštitu od groma, *E* uzemljenje prijemnika, *D* izolirani provodnik, *G* i *g* gruba iskrišta, *F* fino iskrište, a *S* ručka uklopca za uzemljenje. Na slici je antena *A* preko uklopca *S* spojena na prijemnik. Ako se *S* prebaci prema dolje, tada je antena vezana s vodom za uzemljenje, *E*, a prijemnik je od antene odijeljen.



Sl. 124.

Ponavljanje

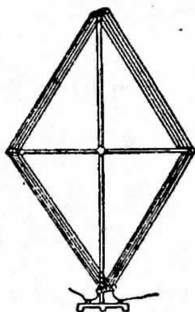
Dobra antena mora imati i dobro *uzemljenje*. Kod jakih lokalnih smetnji može se umjesto uzemljenja upotrebiti izolirani *protuuteg*. Svaka vanjska antena mora biti snabdjevena uređajem za osiguranje od *groma* i za *odvođenje prenapona*, a isto tako i *uklopcem za uzemljenje*. Vod, na koji je priključena zaštita od groma, mora najkraćim putem biti odveden do točke, gdje se uzemljuje. Za ovu zaštitu dolaze u obzir *gruba* i *fina iskrišta* i *tinjalice*. Uređaj mora automatski reagirati već kod napona od 350 V. Dobra uzemljenja su metalne cijevi zabijene u zemlju, vodovod, *uzemljeno* centralno grijanje, i t. d.

Pitanja i odgovori

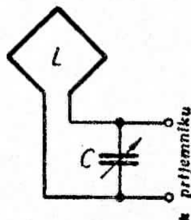
Pitanje: Kako se mora izvesti dobro uzemljenje? *Odgovor:* Žicom, koje promjer iznosi najmanje 2,5 mm; ta žica ne smije biti predugačka i mora se najkraćim putem odvesti do točke uzemljenja. — *P.*: Kako se izvodi veza sa zemljom kod voda za uzemljenje? *O.*: Tako, da se taj vod električki dobro pričvrsti za vodovod, uzemljeno centralno grijanje ili metalnu cijev zabijenu u zemlju. — *P.*: Zašto svaka vanjska antena mora imati zaštitu od groma i prenapona? *O.*: Da se izbjegne opasno nabijanje antene. — *P.*: Što traže propisi za zaštitu od prenapona? *O.*: Zaštitni uređaj mora biti postavljen u blizini mjesta, na kojem antenski dovod ulazi u zgradu i mora automatski reagirati već na napone od 350 V; u vezi s tim uređajem mora postojati i uklopac za uzemljenje antene. — *P.*: Navedi neke uređaje za zaštitu od prenapona? *O.*: Grubo i fino iskrište i tinjalica punjena plemenitim plinom.

Okvirne antene

175. — *Okvirna antena* je ustvari velika pokretna zavojnica, najčešće kvadratičnog ili kružnog oblika (sl. 125). Namotana je na drvenom okviru, koji ima stranice duljine 0,5 do 1 m, i to visokofrekventnom pletenicom s međusobnim razmakom zavoja 3 do 10 mm. Duljina namotane žice, a prema tome i broj zavoja, ovisno je o duljini vala koji dolazi u obzir. Za srednje valove potrebno je oko 30 metara, a za duge oko 110 metara žice. *Induktivitet* okvirne antene kvadratičnog oblika može se približno izračunati po slijedećoj jednadžbi:



Sl. 125.

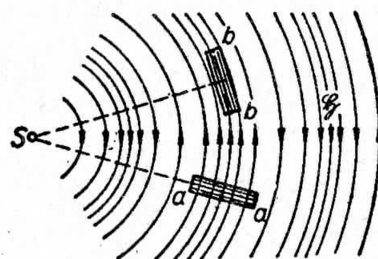


Sl. 126.

$$L = 18{,}4 \cdot a \cdot w^2 \cdot log\left(2{,}15\frac{a}{b}\right) \cdot 10^{-6} \text{ [mH]} \quad \ldots (73)$$

Ovdje je a duljina srtanice u [cm], b širina namotaja u [cm], a w broj zavoja. Ako se okvirna antena induktiviteta L dopuni promjenljivim kondenzatorom C na titrajni krug $L—C$ (sl. 126), može se u g o d i t i na željenu frekvenciju. Iskorišćivanjem rezonancije mogu se na anteni dobiti mnogo veći naponi, nego bez ugađanja.

176. — Zbog vrlo malene efektivne visine okvirne antene (tek nekoliko centimetara), izmjenični naponi, što ih takva antena daje, vrlo su maleni, pa se za prijem s okvirnom antenom moraju upotrebiti prijemnici s većim brojem elektronki. Okvirna antena ima međutim jedno naročito svojstvo, a to je d i r e k c i o n o d j e l o v a n j e, koje je često vrlo poželjno. Stoji li jedna takva antena $a—a$ (sl. 127 gledano odozgo) u *izmjeničnom magnetskom polju* odašiljača S tako, da se r a v n i n a z a v o j n i c e te antene nalazi u s m j e r u o d a š i l j a č a, tada okomito kroz ravninu zavojnice prolazi najveći broj magnetskih silnica. Zbog promjenljivog broja silnica inducira se u anteni napon. Kako se radi o i z m j e n i č n o m magnetskom p o l j u, mijenja se smjer silnica periodički, pa se u anteni inducira i z m j e n i č n i n a p o n, kojeg je frekvencija jednaka onoj frekvenciji, na kojoj radi odašiljač. Stoji li okvirna antena t a n g e n c i j a l n o na magnetske silnice, dakle u smjeru $b—b$, tada kroz ravninu zavojnice silnice uopće ne



Sl. 127.

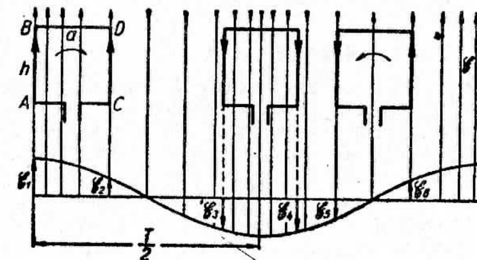
prolaze, pa se u anteni ne inducira napon. To znači, da *prijem okvirnom antenom u ovom položaju nije moguć.* U položaju $a—a$ antena iz polja uzima maksimalnu energiju. Što se dalje pomiče k položaju $b—b$, prijem će biti to slabiji. Takva antena ima dakle izrazito direkciono djelovanje.

177. — Izmjenični napon U, koji se stvara u anteni uslijed djelovanja magnetskog polja jakosti $\mathfrak{H}$, može se izračunati po jednadžbi (11). Budući da je u zraku tok, koji prolazi kroz okvirnu antenu presjeka F: $\Phi = F \cdot \mathfrak{B} = F \cdot \Pi \cdot \mathfrak{H}$, imamo (uzevši u obzir jednadžbu 65) uvrštavanjem u jednadžbu (11): $U = 4{,}44 \cdot w \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{\lambda} \cdot F \cdot \Pi \cdot \mathfrak{H} \cdot 10^{-8}$ [V] ili uz $\Pi = 1{,}256$:

$$U = 16{,}72 \cdot \frac{w \cdot F}{\lambda} \cdot \mathfrak{H} \text{ [V]} \quad \ldots\ldots (74)$$

Ovdje je w broj zavoja, F površina (koju zatvaraju zavoji) u [cm²], $\mathfrak{H}$ jakost magnetskog polja [AZ/cm], λ duljina vala u [m]. Iz ovoga vidimo, da je izmjenični napon proporcionalan površini antene i obrnuto proporcionalan duljini vala. Jednadžba (74) vrijedi međutim samo u slučaju, kad su dimenzije antene malene prema duljini vala.

178. — Okvirna antena ne reagira samo na magnetsko polje, nego isto tako i na izmjenično *električko polje*. Na sl. 128. vidimo okvirnu antenu $ABCD$ u izmjeničnom električkom polju. Na istoj slici prikazan je i sinusoidalni tok električkog polja. Zbog svog smjera električko polje može djelovati samo na o k o m i t e stranice okvirne antene. Na lijevoj stranici $AB = h$ inducirat će se maksimalni napon $U_1 = \mathfrak{E}_1 \cdot h$. Na desnoj strani $CD = h$ inducirat će se napon $U_2 = \mathfrak{E}_2 \cdot h$, koji je nešto manji od napona U_1, jer u udaljenosti $BD = AC = a$ od stranice AB električko polje ima samo još jakost $\mathfrak{E}_2$. Kako U_1 i U_2 imaju isti smjer, bit će ukupni napon na krajevima okvirne antene $U = U_1 = U_2 = (\mathfrak{E}_1 - \mathfrak{E}_2) \cdot h$, pa će kroz antenu teći struja u smjeru strelice na slici. Pola periode kasnije bit će antena izložena djelovanju električkog izmjeničnog polja onako, kako je to prikazano na sl. 128. u sredini. Budući da se sada antena nalazi simetrično u naponskom trbuhu, bit će napon induciran na desnoj i lijevoj stranici jednako velik i istog smjera, pa će ukupni napon biti jednak nuli, te struja ne će teći. Nakon daljnje četvrtine periode u sredini antene je čvor napona, pa će obje bočne stranice antene imati iste napone, ali protivnog smjera. Ukupni napon U bit će u tom momentu n a j v e ć i: $U = (\mathfrak{E}_5 + \mathfrak{E}_6) \cdot h$. Izmjenično električko polje stvara dakle u okvirnoj anteni izmjenični napon, koji se mijenja s frekvencijom odaši-



Sl. 128.

ljača. Vodoravne stranice okvirne antene $BD = AC = a$ nemaju na inducirani napon nikakvog djelovanja i služe samo za to, da zatvaraju strujni krug. Okrenemo li okvirnu antenu $ABCD$ za 90° iz nacrtanog položaja, bit će stranice AB i CD jednako udaljene od odašiljača. Zbog jednake jakosti polja na mjestu tih stranica bit će inducirani napon u obje stranice jednako velik i istog smjera, te će ukupni napon biti jednak nuli. Kroz antenu ne može dakle u ovom položaju nikad teći struja. I iz ovoga također vidimo, da okvirna antena ima d i r e k c i o n o djelovanje.

179. — Za ukupni napon U imamo na temelju izvoda sličnog onome za jednadžbu (74).

$$U = 2\pi \cdot \frac{w \cdot F}{\lambda} \cdot \mathfrak{E} \text{ [V]} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (75)$$

Površina F mora se ovdje (za razliku od jednadžbe 74) unijeti u [m²], duljina vala λ u [m], a jakost električkog polja $\mathfrak{E}$ u [V/m]. Za vanjske antene imali smo prema jednadžbi (71): $U = \mathfrak{E} \cdot h_w$ [V]. Izjednačimo li ovo s jednadžbom (75), tada izraz $h_w = 2\pi \frac{w \cdot F}{\lambda}$ možemo smatrati e f e k t i v n o m v i s i n o m o k v i r n e a n t e n e. I ovdje, dakle, vidimo da je inducirani napon U proporcionalan presjeku okvirne antene, a obrnuto proporcionalan duljini vala. Ukupni napon U je nadalje, prema onome što smo rekli, to veći, što su dulje stranice h i a. Stoga je k v a d r a t i č n a okvirna antena bolja od pravokutne ili kružne.

Ponavljanje

Okvirna antena je ustvari velika pokretna zavojnica, kojoj se induktivitet može izračunati približnim jednadžbama. Dodavanjem promjenljivog kondenzatora može se okvirna antena, kao i svaki drugi titrajni krug, ugoditi na željenu frekvenciju. Pri tome treba paziti, da svaka okvirna antena ima izrazito *direkciono* djelovanje, da dakle u raznim položajima ne prima jednako dobro. Ako je ravnina zavojnice okvirne antene u smjeru odašiljača, tada iz magnetskog i električkog polja odašiljača prima najveću energiju. Ako je ravnina zavojnice okomita na smjer odašiljača, prijem uopće nije moguć. Napon induciran u okvirnoj anteni proporcionalan je broju zavoja, površini presjeka i jakosti magnetskog, odnosno električkog polja, a obrnuto proporcionalan duljini vala.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Što je okvirna antena? *Odgovor:* Velika pokretna zavojnica. — *P.*: Kako se okvirna antena može ugoditi? *O.*: Tako, da se s promjenljivim kondenzatorom spoji u zatvoreni titrajni krug. — *P.*: Koje važno svojstvo posjeduje okvirna antena? *O.*: Ona ima direkciono djelovanje. — *P.*: Kako se to djelovanje očituje? *O.*: Prema svom položaju uzima okvirna antena veću ili manju energiju iz polja. Ako je ravnina zavojnice u smjeru odašiljača, primljena energija je najveća, a ako je okomita na smjer odašiljača, antena uopće ne uzima energiju. — *P.*: O čemu je ovisan izmjenični napon induciran u anteni? *O.*: O broju zavoja, površini, jakosti polja i duljini vala. — *P.*: Koji se oblici okvirnih antena najčešće upotrebljavaju? *O.*: Antene s kvadratičnim i kružnim presjekom.

Pitanja

62. Kako se vanjska antena mora zaštititi od prenapona?
63. Što je protuuteg i čemu služi?

64. Kako dolazi do izmjeničnog napona u okvirnoj anteni?
65. Kako i o čemu je ovisan taj izmjenični napon?

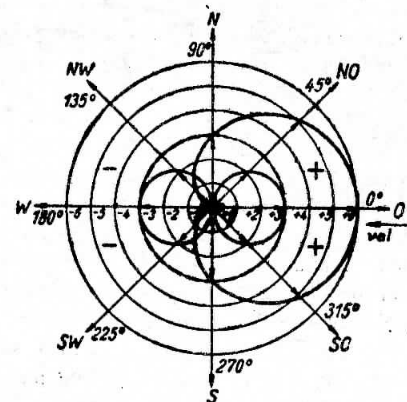
Zadaci

55. Okvirna antena kvadratičnog presjeka s duljinom stranice 1 m namotana je sa 7, odnosno 28 zavoja, koji su međusobno udaljeni 3 mm. Koliki je induktivitet ove antene i na koju se najveću valnu duljinu dade ugoditi pomoću promjenljivog kondenzatora maksimalnog kapaciteta 500 pF?

56. Okvirna antena kružnog presjeka ima promjer 1 m i namotana je sa 10 zavoja. Koliki je inducirani izmjenični napon, ako je jakost električkog polja na mjestu prijema 2 mV/m, uz duljinu vala 300 m?

57. Koju efektivnu visinu ima kvadratična okvirna antena s duljinom stranica 800 mm namotana s 8 zavoja, kod frekvencije 600 kHz?

180. — Direkciono djelovanje okvirne antene može se prikazati d i r e k c i o n o m k a r a k t e r i s t i k o m (sl. 129). Na horizontalnoj osi nanesena je podjela za izmjenični napon induciran u anteni, i to na desno (+) i na lijevo (—). Zatim iz središta okvira antene povučemo toliko krugova, na koliko smo dijelova podijelili jednu stranu horizontalne osi. Uzmimo sada da se odašiljač koji želimo primati, nalazi na primjer u smjeru istok-zapad (O-W). Ako okvirna antena ima položaj, kao na sl. 129. (0°), bit će napon induciran u anteni maksimalan. Isti napon, ali protivnog smjera, imat ćemo i onda, ako antenu okrenemo za 180°, jer se i u tom slučaju ravnina zavojnice nalazi u smjeru odašiljača. Zakrenemo li međutim antenu za 45° u smjer sjeveroistok, odnosno jugozapad (NO, odnosno SW), tada će se inducirati manji napon. Obje vrijednosti napona protivnog smjera nanesene su na radius, koji ima taj smjer. Ako okvirna antena ima smjer N—S (90°, odnosno 270°), inducirani napon bit će jednak nuli, jer je sada ravnina zavojnice okomita na smjer odašiljača. Nađemo li vrijednosti induciranog izmjeničnog napona i za ostale položaje antene, pa ih nanesemo u dijagram, i dobivene točke međusobno spojimo, dobit ćemo kao direkcionu karakteristiku d v i j e k r u ž n i c e. To međutim vrijedi samo u slučaju, ako se u blizini okvirne antene ne nalaze metalne mase ili slično.



Sl. 129.

181. — Iz direkcione karakteristike vidimo, da postavljanje antene u smjer, koji odgovara m a k s i m a l n o m induciranom naponu, nije ni izdaleka tako oštro, kao postavljanje u smjer, koji odgovara m i n i m a l n o m naponu. Ako dakle moramo odrediti smjer jednog odašiljača pomoću *okvirne* antene, možemo to izvršiti tako, da antenu namjestimo u položaj, koji odgovara *minimumu* jakosti **glasa** u prijemniku. Odašiljač se u tom slučaju nalazi u pravcu

okomitom na ravninu zavojnice. Ovo određivanje smjera je međutim *dvoznačno*, jer uvijek dobivamo dva smjera pomaknuta međusobno za 180°, kao što to vidimo na sl. 129., gdje se odašiljač može nalaziti u smjeru *N* ili u smjeru *S*. Da jednoznačno odredimo smjer, u kojem se odašiljač nalazi, antenu moramo spojiti s antenom, koja nema direkciono djelovanje (vertikalna antena). Njezina karakteristika je jednostavna kružnica (sl. 129., crtkana kružnica). Vezu pomoćne antene moramo izvesti tako, da napon, što ga ona daje, bude jednak maksimalnom naponu, što ga daje okvirna antena. Grafičkim zbrajanjem dvaju krugova s krugom, koji odgovara pomoćnoj anteni (zbrajanjem odgovarajućih vrijednosti napona), dobivamo *bubrežastu karakteristiku*. Pri tome treba paziti, da se vrijednosti napona okvirne antene uzimaju uvijek kao pozitivne. Iz sl. 129. vidimo, da bubrežasta karakteristika ima samo jednu točku, koja odgovara maksimalnoj, i jednu, koja odgovara minimalnoj vrijednosti izmjeničnog napona. Obje ove vrijednosti leže u smjeru ravnine zavojnice. Namještanje na minimalnu vrijednost pomaknuto je za 90° prema oba minimuma, koji odgovaraju dvokružnoj karakteristici. Na taj način može se dakle smjer odašiljača jednoznačno odrediti samo jednim uređajem. Ovakvo određivanje smjera vrlo je važno u brodarstvu i avijaciji.

Od praktičnih postupaka određivanja smjera potrebno je spomenuti *vlastito određivanje smjera* i *strano određivanje smjera*. U prvom slučaju telegrafist na brodu ili na avionu sam određuje smjer najmanje dvaju odašiljača, koji se nalaze na zemlji i kojih položaj on znade po njihovom pozivnom znaku ili duljini vala. Tako dobiva dva smjera. Ako ih unese u geografsku kartu i nađe njihovo presjecište, dobiva položaj broda ili aviona. Kod stranog određivanja smjera brod daje sam neko vrijeme bežično svoj pozivni znak, koji primaju dvije stanice s uređajima za traženje smjera na zemlji. Na taj način stanice na zemlji određuju dva smjera, koje javljaju jedna drugoj. Jedna od njih unosi podatke u geografsku kartu i određuje položaj aviona ili broda, te ga bežično javlja. Čitav postupak traje nekoliko minuta. Ako u blizini postoji samo jedna stanica s uređajem za određivanje smjera, tada avion leti ravno jednoličnom brzinom, određujući sam smjer te stanice nekoliko puta za vrijeme leta, pa onda iz prevaljenog puta i smjerova, koje je više puta odredio, može izračunati svoj položaj. Kod svih takvih određivanja smjera treba voditi račun o tome, da metalne mase aviona ili broda manje ili više otklanjaju elektromagnetske valove, pa tako dolazi do pogrešaka kod određivanja smjera. No one se mogu izravnati korekturom, koju je dovoljno provesti samo jedamput. Za tu svrhu određuje se smjer gibanja optički i uspoređuje sa smjerom ustanovljenim bežičnim usmjerivanjem.

Ponavljanje

Direkciono djelovanje okvirne antene dade se prikazati *direkcionom karakteristikom*. Za običnu okvirnu antenu je ta karakteristika dvostruka kružnica s dvije maksimalne i dvije minimalne vrijednosti izmjeničnog napona induciranog u anteni. Poveže li se okvirna antena s pomoćnom antenom, koja nema direkcionog djelovanja, može se *smjer* odrediti jednoznačno, jer tada imamo još samo jednu maksimalnu, odnosno minimalnu vrijednost izmjeničnog napona u anteni (bubrežasta karakteristika). Na ovaj način se može izvršiti jednoznačno određivanje smjera vožnje na primjer broda ili aviona, što je za brodarstvo i avijaciju vrlo važno. Kod *vlastitog* određivanja smjera određuje telegrafist aviona ili parobroda sam u bilo kojem momentu svoj položaj. Kod *stranog* određivanja smjera određuju položaj dvije stanice na kopnu, pa ga onda javljaju bežičnim putem. Za tu svrhu potrebno je da objekt, koji se giba, daje nekoliko minuta svoj pozivni znak. Pogreške uzrokovane metalnim masama aviona ili broda dadu se ukloniti posebnim korekturama.

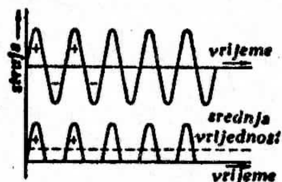
Pitanja i odgovori

Pitanje: Kako se dobiva direkciona karakteristika okvirne antene? *Odgovor:* Tako, da se na papir s polarnim koordinatama unese vrijednost napona induciranog u okvirnoj anteni u ovisnosti o smjeru. Na taj način dobivene točke spoje se u krivulju — *P.:* Kakva je direkciona karakteristika kod obične okvirne antene? *O.:* Ona je sastavljena od dvije kružnice, koje imaju diralište u osi okvirne antene. — *P.:* Kad se u okvirnoj anteni induciraju najveći, a kad najmanji izmjenični naponi? *O.:* Najveći izmjenični naponi induciraju se onda, kad antena zatvara sa smjerom odašiljača kut 0° ili 180°, a najmanji kad je taj kut 90° ili 270° — *P.:* Što iz toga slijedi? *O.:* Da je određivanje smjera dvoznačno. — *P.:* Kako se to određivanje može učiniti jednoznačinim? *O.:* Istovremenom upotrebom okvirne antene i pomoćne antene, koja nema direkcionog delovanja. — *P.:* Kako u tom slučaju izgleda direkciona karakteristika? *O.:* Ona je bubrežasta krivulja. — *P.:* Koja su dva najvažnija postupka za određivanje položaja broda ili aviona? *O.:* Vlastito određivanje smjera i strano određivanje smjera. — *P.:* U čemu je razlika između ova dva postupka? *O.:* Kod vlastitog određivanja smjera vozilo samo određuje svoj trenutočni položaj, dok se kod stranog određivanja taj položaj određuje s kopna i javlja vozilu bežično. — *P.:* Čemu služi korekcija? *O.:* Otklanjaju pogrešaka, koje uzrokuju metalne mase aviona ili broda.

Kristalni detektor

182. — Nakon dosadašnjeg razmatranja o proizvođenju, isijavanju i prijemu elektromagnetskih valova dolazimo konačno i do odgovora na pitanje kako se primljeni valovi mogu učiniti *primjetljivima*. Svakako je najbliže ideja, da se izmjenične struje, što ih imamo u anteni, jednostavno dovedu na telefon ili instrument za mjerenje izmjenične struje. To međutim ne bi dovelo do željenog uspjeha, jer bi primljeni titraji zbog svoje vrlo visoke frekvencije bili jednostavno prigušeni induktivitetom telefonske zavojnice, a s druge strane nikakva membrana niti bilo kakva kazaljka ne bi mogla slijediti vanredno brze promjene struje. Samo kod prijema *prigušenih* valova, dakle onih, koje daju generatori sa zujalom ili iskrama, mogli bi udarci pojedinih grupa titraja biti primijećeni u telefonu, pa bi se tako kod frekvencije zujala 1000 titraja u sekundi čuo ton frekvencije 1000 Hz

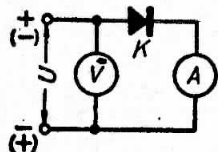
183. — Prilike su međutim drukčije, ako se visokofrekventni titraji, koje primamo, naročitim uređajem isprave, to jest oslobode pozitivnih ili negativnih poluvalova (sl. 130), pa tek onda puste da djeluju na telefon ili instru-



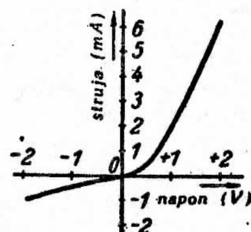
Sl. 130.

ment. U tom slučaju imamo „pulzirajuću istosmjernu struju", dakle struju, koja ima uvijek isti smjer, ali promjenljivu jakost, kojoj odgovara neka srednja vrijednost (oko 32% maksimalne vrijednosti, kako je to crtkano prikazano na sl. 130). Na ovu srednju vrijednost namjestit će se kazaljka instrumenta, odnosno privlačenje telefonske membrane. No zbog toga, što su aplitude visokofrekventnih titraja jednake, ne bismo u telefonu čuli ništa osim jednokratnog „knak". Ispravljanje se izvodi „električnim ventilima", koji se obično nazivaju *ispravljačima* ili *detektorima* (od lat. detectus = = otkriven). Najjednostavniji detektor je *detektor s kristalom*, koji je već dugo poznat, a upotrebljava se još i danas. On se, kako mu i ime kaže, sastoji od prirodnog ili umjetnog kristala, i metalnog šiljka, koji se toga kristala dotiče.

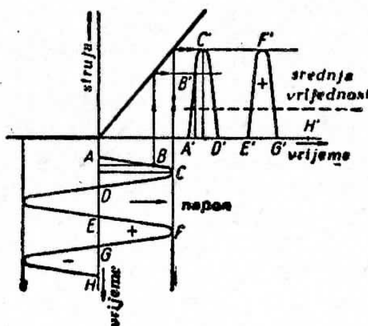
184. — Da odredimo *karakteristiku* (krivulju koja pokazuje ovisnost struje o naponu) *detektora*, detektor *K* (sl. 131) i voltmetar *V* priključimo na promjenljivi napon *U* i pri tome ampermetrom *A* mjerimo struju, koja kroz detektor teče kod raznih napona. Rezultat tog mjerenja je krivulja na sl. 132., to jest karakteristika kristalnog detektora. Vidimo, da je jakost struje kod p o z i t i v n i h napona znatno veća nego kod n e g a t i v n i h. To znači da detektor u većoj mjeri propušta struju, dakle elektrone, u j e d n o m smjeru, dok je u drugom smjeru gotovo uopće ne propušta. Otpor detektora je prema tome u jednom smjeru malen, a u drugom vrlo velik. Kad bismo imali s a v r š e n detektor, tada u jednom smjeru ne bismo uopće imali struje pa bi karakteristika imala oštro koljeno, i dalje od toga koljena imala bi posve horizontalan tok (sl. 133). Priključimo li na savršen detektor umjesto istosmjernog napona *izmjenični* napon, tada će zbog ispravljanja samo pozitivni poluvalovi uzrokovati struju u detektorskom krugu, dok djelovanje negativnih poluvalova ne će upoće doći do izražaja (sl. 133). Iza detektora imat ćemo dakle pulzirajuću struju, kojoj je srednja vrijednost prikazana crtkanom linijom.



Sl. 131.



Sl. 132.

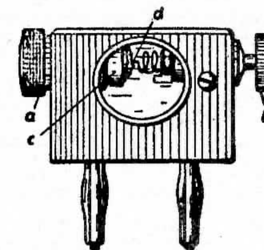


Sl. 133.

185. — Do k o n s t r u k c i j e krivulja, koje prikazuju ovu pulzirajuću istosmjernu struju, dolazimo na način prikazan na sl. 133. Sa

ABCDEFGH prikazana je vremenska promjena izmjeničnog napona. Pomoću karakteristike kristala odredimo momentanu vrijednost istosmjerne struje, koja odgovara momentanoj vrijednosti izmjeničnog napona, i dobivene vrijednosti nanesemo iznad h o r i z o n t a l n e vremenske osi. Točkama napona *A, B, C, D, E, F, G, H* odgovaraju točke struje *A', B', C', D', E', F', G', H'*. Na slici je posebno prikazana konstrukcija točaka *B', C' i E'* za vrijednosti struje, koje odgovaraju vrijednostima napona *B, C i F* (pazi na strelice!). N e g a t i v n i poluvalovi izmjeničnog napona (lijevo od osi *ADEGH*) ne pridonose n i š t a stvaranju pulzirajuće istosmjerne struje, pa zato u vremenu *D'E', G'H'* i t. d. struja ne teče kroz detektor.

186. — Na sl. 134. vidimo primjer praktičke izvedbe detektora s kristalom. Kristal se nalazi u metalnoj kapici *c*, a dodiruje ga tanki metalni šiljak *d* od srebrne ili brončane žice. Dugme *a*, odnosno *b*, omogućuje okretanje kristala, odnosno mijenjanje tlaka metalnog šiljka. Ispravljačko djelovanje ovisno je o ispravnom izboru tlaka, a i o tome, da li je površina kristala čvrsta ili nije. Mana je ovakvih detektora, da su osjetljivi na potresanje. No ta je mana malena prema prednostima, da kod detektorskog prijemnika nisu potrebne baterije.



Sl. 134.

Kao *kristali* za detektore dolaze u obzir oksidi ili sulfidi, dakle spojevi metala s kisikom ili sumporom, kao na primjer olovni sjajnik (galenit PbS), pirit (FeS_2), halkopirit ($Cu_2S \cdot Fe_2S_3$), cinkit (ZnO) i t. d. Često su međutim ovakvi detektori sastavljeni od dva kristala, pa tada jedan od njih nadomještava metalni šiljak. Oni su, za razliku od običnih, neosjetljivi na potresanje, pa ih prema tome nije potrebno često ugađati.

Ponavljanje

Elektromagnetski valovi, koje prima prijemna antena, mogu se učiniti primjetljivima *ispravljanjem*. Poluvalove jednog smjera *detektor* propušta, a drugog smjera zadržava. Uslijed toga u krugu detektora nastaje pulzirajuća i s t o s m j e r n a struja, kojoj se srednja vrijednost može izmjeriti instrumentom za mjerenje istosmjerne struje. Najjednostavniji ispravljač je *kristalni detektor*, koji se sastoji od kristala (metalni oksid ili sulfid) i metalnog šiljka, koji kristal dodiruje. Karakteristika takvog detektora ima u jednom smjeru skoro vodoravan položaj, dok je u drugom smjeru strma.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Zašto se visokofrekventni titraji, koje prima antena, ne mogu učiniti primjetljivima telefonom ili instrumentom za mjerenje? *Odgovor:* Zato, što membrana, kao ni kazaljka instrumenta, ne može slijediti tako brze titraje. — *P* Kako se radio-valovi mogu učiniti primjetljivima? *O.:* Ispravljanjem. — *P.:* Što razumijevamo pod ispravljanjem? *O.:* Pretvaranje izmjenične struje u pulzirajuću istosmjernu; za to je potrebno potisnuti pozitivne ili negativne poluvalove izmjenične struje. — *P.:* Koji je najjednostavniji ispravljač? *O.:* Detektor s kristalom. — *P.:* Kako je takav detektor građen? *O.:* On se sastoji ili od dva različita kristala, koji se do-

diruju ili od jednog kristala, koji dodiruje metalni šiljak. — *P.:* Što nam pokazuje karakteristika detektora? *O.:* Ovisnost istosmjerne struje, koja teče kroz detektor, o istosmjernom naponu, koji je na njega priključen.

Pitanja

66. Koja je svrha istovremene upotrebe okvirne i pomoćne antene?
67. U čemu je ispravljačko djelovanje kristalnog detektora nesavršeno?
68. Od čega se sastoje detektorski kristali, koji se najčešće upotrebljavaju?

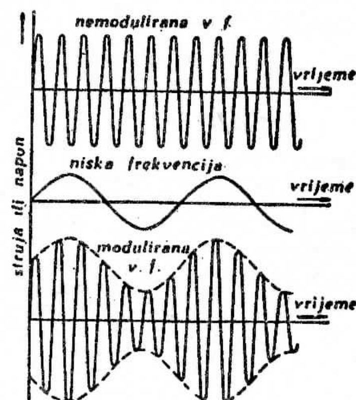
Zadaci

58. Telegrafist na brodu *S* ustanovio je pomoću okvirne antene, da se dvije poznate stanice *A* i *B* na obali nalaze točno u smjeru jugo-jugozapad i jugoistok. Kako on može pomoću geografske karte odrediti, gdje se brod u tom času nalazi? (grafičko rješenje!).

59. Pomoću dva uređaja za određivanje smjera, *A* i *B*, ustanovljeno je s kopna da se odašiljač nekog aviona nalazi točno u smjeru sjeveroistok, odnosno sjever-sjeverozapad. Obje stanice *A* i *B* javljaju jedna drugoj određeni smjer i određuju položaj aviona. Ustanovljeni položaj javljaju onda bežično avionu. Na koji način su one mogle ustanoviti položaj aviona (grafičko rješenje!)?

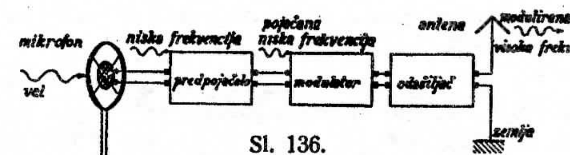
Modulacija i demodulacija visokofrekventnih titraja

187. — U posljednjim odsjecima bavili smo se pitanjima, kako se mogu učiniti primjetljivim visokofrekventni titraji s t a l n i h amplituda. Ako je, međutim, potrebno bežično prenijeti govor ili glazbu, *niskofrekventni* titraji glazbe ili govora moraju se na neki način utisnuti *u titraje visoke frekvencije,* jer se sa samim niskofrekventnim titrajima ne mogu premostiti znatnije udaljenosti. Ovo utiskivanje tonskih titraja u visokofrekventne titraje naziva se *modulacijom.* Prema tome možemo govoriti i o *modularnim visokofrekventnim titrajima* (sl. 135). Niskofrekventni titraji glazbe ili govora primaju se mikrofonom (sl. 136.) i pretvaraju u niskofrekventne struje, kojima je amplituda i frekvencija vjerna slika amplitude i frekvencije glazbe, odnosno govora. Ovi se niskofrekventni titraji pojačavaju u „pretpojačalu" i preko „modulatora" dovode generatoru visokofrekventnih struja, dakle odašiljaču, koji preko odašiljačke antene isijava modulirane visokofrekventne titraje. T o č a n opis ovog procesa dat ćemo kasnije, kad bude govora o odašiljačima s elektronkama.



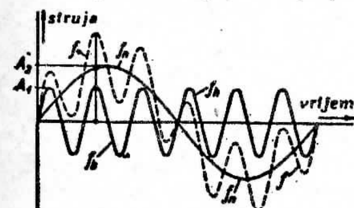
Sl. 135.

188. — Modulacijom se djeluje na amplitudu visokofrekventnih titraja (sl. 135), pa se takav način modulacije naziva a m p l i t u d n o m m o d u l a c i j o m. Što je glasniji, odnosno tiši ton, koji želimo prenijeti, to će se više, odnosno manje mijenjati amplituda visokofrekventnog vala. Što je taj ton viši, odnosno niži, to ćemo više, odnosno manje takvih promjena amplituda imati u jedinici vremena. Visokofrekventni val, koji odašiljač isijava, služi dakle samo kao „nosilac" niskofrekventnih titraja, pa se on zato i naziva



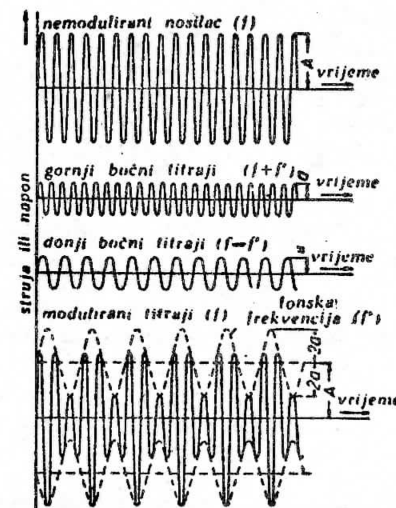
Sl. 136.

val nosilac. Taj val, dakle, na neki način nosi kroz eter niskofrekventne titraje od odašiljačke antene do prijemne antene. Proces modulacije ne smijemo međutim shvatiti kao jednostavnu superpoziciju (zbrajanje) titraja, iako je pojam modulacije srodan pojmu superpozicije. Zbrojimo li naime titraje znatno različitih frekvencija (na primjer $f_h = 6$ Hz i $f_n = 1$ Hz) i raznih amplituda (na primjer A_1 i A_2), tada nam grafičko zbrajanje daje rezultirajući titraj f (sl. 137), kod kojeg se odmah vidi, da je sastavljen od obaju titraja f_h i f_n. Dalje također vidimo, da „noseća frekvencija" *nije* modulirana niskom frekvencijom, jer amplituda rezultirajućeg titraja f ostaje obzirom na nul-liniju, koja se mijenja u taktu niske frekvencije (f_n), uvijek ista, tako da se niska frekvencija f_n ne prenosi. Ovakav slučaj imamo, na primjer, kod izmjenične struje, koja osim osnovne frekvencije ima i harmoničkih frekvencija.



Sl. 137.

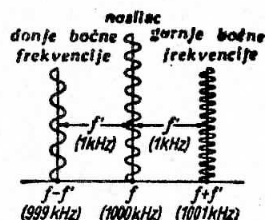
189. — M o d u l i r a n e visokofrekventne titraje, dakle titraje, kojima se amplituda sinusoidalno mijenja u ritmu niske frekvencije, dobivamo superpozicijom triju nemoduliranih sinusoidalnih titraja. Moramo li, na primjer, visokofrekventne titraje frekvencije $f = 1000$ kHz modulirati tonom $f' = 1$ kHz, tada ćemo modulirane visokofrekventne titraje dobiti tako, da sinusoidalne titraje s $f = 1000$ kHz i amplitudom A superponiramo d v a m a sinusoidalnim titrajima, od kojih je jedan $f + f' = 1001$ kHz, a drugi $f - f' = 999$ kHz, a oba iste amplitude a (sl. 138). Na slici su odnosi frekvencija samo približni i nisu naneseni u mje-



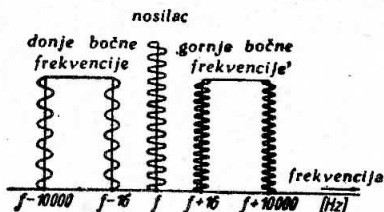
Sl. 138.

rilu. Frekvencija $f + f'$ naziva se g o r n j a b o č n a f r e k v e n c i j a, a $f - f'$ d o n j a b o č n a f r e k v e n c i j a. Amplituda moduliranog vala nije više konstantna, nego se mijenja oko svoje srednje vrijednosti A za vrijednost 2 a. Kako se nadalje vidi na sl. 138, pojavljuju se utisnuti niskofrekventni titraji frekvencije $f' = 1$ kHz kao gornja i donja granična linija moduliranih visokofrekventnih titraja. Nisku frekvenciju dobivamo superpozicijom obiju bočnih frekvencija. U slijedećim odsjecima dokazat ćemo ove tvrdnje računski i grafički.

190. — Ako se mijenja jakost niskofrekventnih titraja, kojima se modulira, mijenja se i amplituda moduliranih titraja. Ako se mijenja frekvencija titraja, kojima se modulira, onda su bočne frekvencije bliže (duboki ton) ili dalje (visoki ton) od noseće frekvencije. Ako dakle odašiljačkoj anteni privedemo modulirane visokofrekventne titraje, isijavat će antena osim noseće frekvencije f (na primjer 1000 kHz) i obje bočne frekvencije $f + f'$ (na primjer 1000 kHz) i $f - f'$ (999 kHz), kako se to vidi na sl. 139. Udaljenost bočnih frekvencija od noseće frekvencije jednaka je frekvenciji f', kojom se modulira. Kako se međutim nikad ne prenosi pojedini ton, nego zvukovi, dakle svi titraji sadržani u glazbi i govoru, uključivši tu osnovne i harmoničke titraje, u val nosilac bit će utisnuto čitavo mnoštvo bočnih frekvencija (na primjer od 16 Hz do 10000 Hz). U tom slučaju ne možemo dakle više govoriti o bočnoj frekvenciji, nego o b o č n i m p o j a s i m a (sl. 140), pa razlikujemo g o r n j i i d o n j i bočni pojas. Širina tog pojasa jednaka je širini niskofrekventnog područja, koje želimo prenijeti. Budući da su ovdje oba bočna pojasa jednako daleko od noseće frekvencije, bit će *širina čitavog pojasa frekvencija, koje odašiljač isijava, jednaka dvostrukoj najvišoj frekvenciji, kojom se modulira.* Kako ćemo vidjeti u odsjeku 203, iz tehničkih razloga nije moguće svakom odašiljaču osigurati po volji širok pojas frekvencija.



Sl. 139.



Sl. 140.

Ponavljanje

Za prijenos glazbe i govora moraju se visokofrekventni titraji, koje antena isijava, *modulirati* niskofrekventnim titrajima. Pod *modulacijom razumijevamo* periodičko mijenjanje amplitude visokofrekventnih titraja (amplitudna modulacija). Val, koji odgovara stvarnim visokofrekventnim titrajima, ustvari je *val nosilac*, a frekvencija, koja njemu odgovara, jest noseća frekvencija. Ta frekvencija umanjena ili povećana za frekvenciju f' niskofrekventnih titraja naziva se *gornjom* ($f + f'$) ili *donjom* ($f - f'$) *bočnom frekvencijom*. Modulirani visokofrekventni titraji nastaju superpozicijom triju sinusoidalnih titraja, koji imaju frekvencije f, $f + f'$ i $f - f'$, ako oba posljednja titraja imaju jednake amplitude. Pri tome se amplituda dobivenih moduliranih visokofrekventnih titraja mijenja za d v o s t r u k u vrijednost amplitude obiju bočnih frekvencija. Obrnuto, modulirani odašiljač isijava t r i frekvencije: f, $f + f'$ i $f - f'$. Kod prijenosa glazbe i govora sadržane su u modularinom visokofrekventnom valu ne samo pojedine bočne frekvencije, nego bočni pojasevi, koji odgovaraju prenošenom niskofrekventnom području. Širina pojasa moduliranog odašiljača jednaka je dakle d v o s t r u k o j maksimalnoj frekvenciji, kojom se modulira.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Što razumijevamo pod moduliranim visokofrekventnim titrajima? *Odgovor:* Visokofrekventne titraje, kojima se amplitude periodski mijenjaju u taktu niskofrekventnih titraja. — *P.:* Što je val nosilac? *O.:* To je osnovni titraj nemoduliranog odašiljača. — *P.:* Kako nastaju modulirani visokofrekventni titraji? *O.:* Superpozicijom sinusoidalnih titraja, koji imaju frekvencije f, $f + f'$ i $f - f'$, ako je f frekvencija, koja odgovara valu nosiocu, a f' frekvencija niskofrekventnih titraji. — *P.:* Kako se nazivaju visoke frekvencije $f + f'$ i $f - f'$? *O.:* Gornje i donje bočne frekvencije. — *P.:* Koje područje frekvencija obuhvataju bočni pojasevi? *O.:* Čitavo niskofrekventno područje, koje odgovara glazbi ili govoru, koje želimo prenositi. — *P.:* Koje područje frekvencija obuhvataju modulirani titraji jednog odašiljača? *O.:* Područje, koje je jednako dvostrukom području niskofrekventnih titraja, kojima se modulira.

191. — Sada ćemo grafički i računski dokazati da se modulirani titraji zaista dobivaju superpozicijom t r i j u nemoduliranih sinusoidalnih titraja. Na sl. 141. (gore) vidimo, na primjer, sinusoidalne titraje, kojima se frekvencije malo razlikuju: $f + f' = 5$ Hz, $f - f' = 4$ Hz. Amplitude obaju titraja jednake su a. Ovi titraji dadu se prikazati jednadžbama (za napone) $e_1 = a \cdot \sin \omega_1 t = a \cdot \sin [2\pi (f + f')t]$ i $e_2 = a \cdot \sin \omega_2 t = a \cdot \sin [2\pi (f - f')t]$. Zbrojimo li ove sinusoidalne titraje grafički (na primjer $BB + BD = BE$), dobivamo rezultirajuće titraje frekvencije $f = 4{,}5$ Hz. Računski dobivamo ovo: $e_3 = e_1 + e_2 = a \{ \sin [2\pi (f + f')t] + \sin [2\pi (f - f')t] \}$. Ako zbog skraćivanja uvrstimo $2\pi (f + f')t = \alpha$, a $2\pi (f - f')t = \beta$, po poznatom odnosu $\sin \alpha + \sin \beta = 2 \cdot \sin (\alpha + \beta/2) \cdot \cos (\alpha - \beta/2)$ imamo jednadžbu:

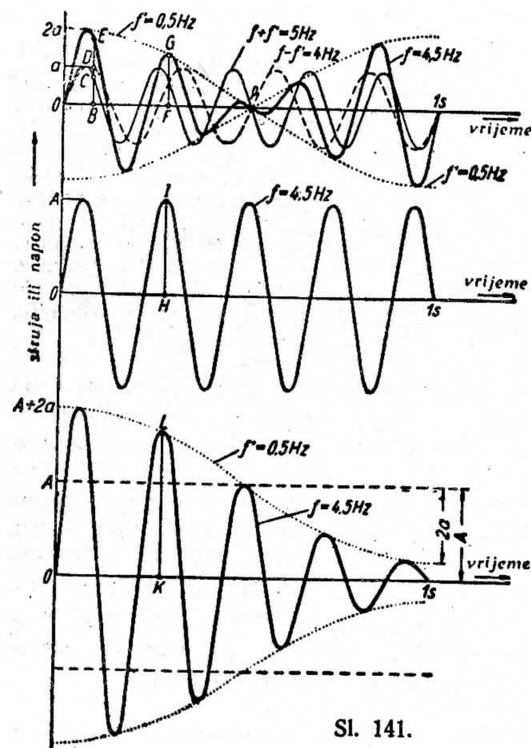
$$\boxed{e_3 = (2\, a \cdot \cos 2\pi f' t) \cdot \sin 2\pi f t} \quad . \; . \; . \; (76)$$

Iz ove jednadžbe vidimo, da su rezultirajući titraji e_3 također sinusoidalni, i da im je frekvencija f, a n a j v e ć a amplituda $2a$. Amplitude se mijenjaju kao $\cos 2\pi \cdot f't$ s frekvencijom f. Ovdje govorimo o treptajima, jer se amplitude mijenjaju periodski od maksimalne vrijednosti ($2a$) na minimalnu vrijednost (0). Imamo istu situaciju, kao kod viljušaka, koje istodobno titraju, ali s frekvencijama koje se tek neznatno razlikuju. I ovdje čujemo ton s jakošću glasa, koja pada i raste. Iz $f + f' = 5$ Hz i $f - f' = 4$ Hz zbrajanjem dobivamo $2f = 9$, odnosno $f = 4{,}5$ Hz, a odbijanjem $2f' = 1$, odnosno $f' = 0{,}5$ Hz. Granična linija, po kojoj se mijenjaju amplitude, ima frekvenciju $f' = 0{,}5$ Hz, dok je treptajna frekvencija jednaka

$(f=f') - (f-f') = 5-4 = 1$ Hz. U jednoj sekundi imamo dakle $2f' =$ = 1-kratno povećavanje i smanjivanje amplituda.

192. — Sastavimo li sada grafički dobivene titraje e_s sa sinusoidalnim titrajima $e_0 = A \cdot \sin 2\pi f t$ frekvencije $f = 4,5$ Hz i amplitudom A (sl. 141 u sredini; na primjer $HI + FG = KL$), dobivamo zaista željene modulirane titraje e frekvencije $f = 4,5$ Hz (sl. 141 dolje). Računski imamo:

$$e = e_0 + e_s = (A + 2a \cdot \cos 2\pi f' t) \cdot \sin 2\pi f t \quad . . (77)$$



Sl. 141.

Odmah dakle vidimo, da se radi o sinusoidalnim titrajima frekvencije $f =$ = 4,5 Hz maksimalne amplitude $A + 2a$. Amplitude se *mijenjaju* kao $\cos 2\pi f' t$ s frekvencijom $f' = 0,5$ Hz oko nul-linije određene amplitudom A. Iako je na sl. 141. (dolje) nacrtana samo polovica čitavih titraja, ipak se usporedbom sa sl. 138. (dolje) vidi principijelno slaganje. Ukratko bismo mogli reći, da su se prvotni sinusoidalni titraji frekvencije $f =$ = 4,5 Hz superpozicijom sa sinusoidalnim titrajima frekvencije $f + f' = 5$ Hz i $f - f' = 4$ Hz pretvorili u modulirane titraje modulirane s frekvencijom $f = 0,5$ Hz, kojoj se amplituda mijenja za vrijednost $2a$ prema gore i dolje oko srednje vrijednosti A. Obrnuto možemo utvrditi važnu činjenicu: *Odašiljač moduliran niskom frekvencijom f' isijava istovremeno osim prijenosne frekvencije f također i obje bočne frekvencije $f + f'$ i $f - f'$.* Time smo dokazali ranije tvrđenje.

193. — Jakost modulacije daje se stupnjem modulacije m. Time se označuje *odnos maksimalne amplitude niskofrekventnih titraja prema amplitudi vala nosioca*, dakle odnos (vidi sl. 138 i 141):

$$m = \frac{2a}{A}$$

Ako je $2a = A$, tada je stupanj modulacije $m = 1$ ili 100%. Za $2a = 0,7$ A je $m = 0,7$ ili 70%, što znači da je maksimalna amplituda niskofrekventnih titraja 70% od amplitude visokofrekventnog titraja. Kod moduliranih titraja prikazanih na sl. 138. i 141. je $m = 60\%$, odnosno 80%. Kod ovih podataka radi se dakako samo o maksimalnom stupnju modulacije, jer je stupanj modulacije to manji, što je tiši ton, koji se prenosi, dakle što je manja amplituda niskofrekventnih titraja.

Ponavljanje

Superponiramo li sinusoidalne titraje, koji imaju frekvencije $f + f'$ i $f - f'$ koje se međusobno malo razlikuju, a imaju jednake amplitude a, dobit ćemo sinusoidalne titraje frekvencije f, kojoj će se amplituda mijenjati periodski s frekvencijom f' između vrijednosti 0 i $2a$. Na taj način nastaju takozvani treptaji. Superponiramo li ovakve treptaje sinusoidalnim titrajima frekvencije f i amplitude A, nastaju modulirani sinusoidalni titraji frekvencije f s amplitudom koja se mijenja između vrijednosti $A + 2a$ i $A - 2a$. Odašiljač moduliran frekvencijom f isijava prema tome uz prenosnu frekvenciju f i bočne frekvencije $f + f'$ i $f - f'$. *Stupanj modulacije m* daje odnos maksimalne amplitude niskofrekventnih titraja ($2a$) prema amplitudi visokofrekventnog vala nosioca (A).

Pitanja i odgovori

Pitanje: Što su treptaji? *Odgovor:* Titraji kod kojih amplitude periodički rastu i padaju. — *P.:* Kako nastaju treptaji? *O.:* Superpozicijom sinusoidalnih titraja f i f', kojima se frekvencije malo razlikuju. — *P.:* Kako nastaju modulirani titraji frekvencije f modulirani s frekvencijom f'? *O.:* Superpozicijom sinusoidalnih titraja, koji imaju frekvencije $f + f'$ (amplituda a), $f - f'$ (amplituda a) i f (amplituda A). — *P.:* Kako se mijenjaju amplitude moduliranih titraja? *O.:* Mijenjaju se s frekvencijom f, između vrijednosti $A + 2a$ i $A - 2a$. — *P.:* Što nam daje stupanj modulacije? *O.:* Odnos maksimalne amplitude niskofrekventnih titraja prema amplitudi vala nosioca.

Pitanja

69. Čemu služi modulacija visokofrekventnih titraja?
70. Koje sve frekvencije isijava modulirani odašiljač?
71. Što znači, da je stupanj modulacije nekog odašiljača 60%?

Zadaci

60. Val nosilac nekog odašiljača ima duljinu 500 m, a moduliran je tonom 1,2 kHz. Koliko visokofrekventnih titraja otpada na jedan titraj, kojim se modulira?

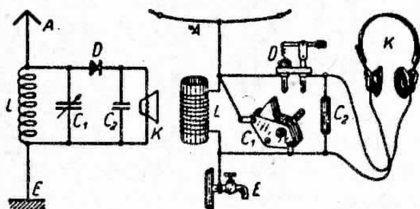
61. Nacrtaj modulirani val s procentom modulacije 25%, 50% i 100%!

62. Imamo visokofrekventne titraje 200 kHz modulirane s 800 Hz. Amplituda visokofrekventnih titraja je 100 V, a titraja, kojima se modulira, 70 V. Iz kojih je frekvencija sastavljen modulirani visokofrekventni val i koliki je stupanj modulacije?

194. — Ako na prijemnu antenu dođu visokofrekventni modulirani titraji, pa se dovedu direktno na telefon, ne će se modulacija moći primijetiti, jer se pozitivni i negativni poluvalovi moduliranih visokofrekventnih titraja u svom

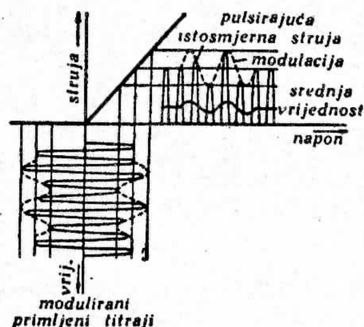
djelovanju na membranu poništavaju. Modulirane visokofrekventne titraje moramo dakle, kao i u odsjeku 184., *ispraviti*, to jest potisnuti bilo pozitivne, bilo negativne poluvalove. U tom slučaju govorimo, za razliku od modulacije, o d e m o d u l a c i j i. Demodulacijom izvlačimo iz visokofrekventnih titraja glazbu, odnosno govor, to jest titraje, kojima smo modulirali, koji su dakle bili utisnuti u val nosilac. Demodulacija se može u najjednostavnijem slučaju provesti kristalnim detektorom (vidi odsjek 183).

195. — Na sl. 142. vidimo teoretsku principijelnu shemu (pripaziti na normirane oznake) i primjer za praktičko izvođenje jednostavnog prijemnika s k r i s t a l o m kao d e t e k t o r o m. Visokofrekventni modulirani titraji dovode se iz antene *A* na ugođeni titrajni krug *L*—C_1; *E* predstavlja uzemljenje. Ugađanjem titrajnog kruga pomoću promjenljivog kondenzatora C_1 visokofrekventni titraji se znatno pojačavaju. Kristal *D* ispravlja visokofrekventne titraje (sl. 143). Da stvar pojednostavnimo pretpostavit ćemo, da je detektor savršen (kao na sl. 133), dakle da imamo detektor s karakteristikom, koja u nul-točki ima oštro koljeno. Ispravljanjem nastaje pulzirajuća istosmjerna struja, kojoj srednja vrijednost, za razliku od onoga, što smo prikazali na sl. 133., nije stalna, nego se mijenja u taktu modulacije. Visokofrekventni impulsi pulzirajuće istosmjerne struje prolaze kroz kondenzator C_2, koji je spojen paralelno slušalicama *K*. Kondenzator, kako znamo, predstavlja za visokofrekventne struje vrlo malen otpor.



Sl. 142.

Kondenzator C_2 ne smije međutim imati prevelik kapacitet (oko 1000 do 2000 pF), da ne bi propuštao i niskofrekventne titraje. Često je ovaj kondenzator suvišan, jer dovodne žice do telefonskih slušalica i namotaj slušalica imaju dovoljno velik kapacitet. Istosmjerna struja, koja se mijenja u ritmu modulacije, djeluje na telefonsku membranu, pa se njezino titranje može čuti.

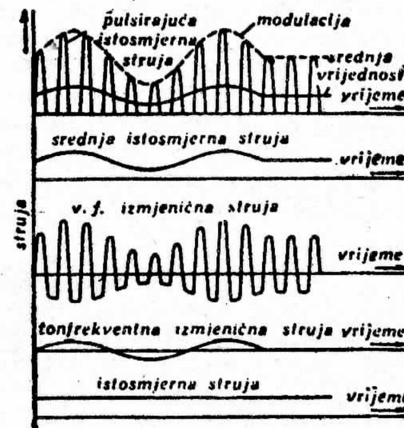


Sl. 143.

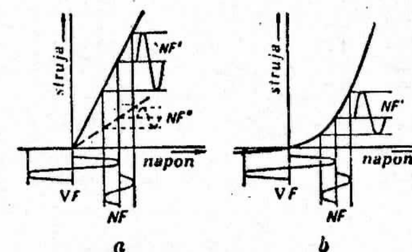
196. — Točan tok demodulacije vidimo na sl. 144. Pulzirajuća istosmjerna struja, koja nastaje ispravljanjem, može se rastaviti u *srednju vrijednost istosmjerne struje* i *visokofrekventnu izmjeničnu struju*. Ako naime ove dvije struje grafički zbrojimo, dobivamo opet sasvim gore nacrtanu pulzirajuću istosmjernu struju. Visokofrekventna izmjenična struja teče kroz kondenzator C_2 (sl. 142), a promjenljiva istosmjerna struja kroz slušalice. No također i promjenljiva istosmjerna struja može se rastaviti na dvije komponente, naime na *niskofrekventnu izmjeničnu struju* i stalnu *istosmjernu*, jer i ove dvije struje grafički zbrojene daju promjenljivu istosmjernu struju. Niskofrekventna struja je ona, koju smo

upravo htjeli dobiti demodulacijom, da bismo je mogli čuti slušalicom, dok istosmjerna struja djeluje tako, da stalno lagano privlači telefonsku membranu.

197 — I ova razmatranja pokazuju nam, da je demodulacija samo onda moguća, ako karakteristika ispravljača ima jedno izrazito zakrivljenje, a najbolje je, ako je to oštro koljeno. Ako je karakteristika *pravac* (sl. 145-a), onda su niskofrekventni titraji *NF'* posve jednaki titrajima, koji su sadržani u modularnom valu *NF*. *HF* predstavlja visokofrekventne titraje, u koje su utisnuti niskofrekventni titraji *NF*, kojima se vrši modulacija. Ako karakteristika ispravljača nije pravac, u stanovitim prilikama nastupaju znatna *izobličenja* niskofrekventnih titraja. To se vidi i na sl. 145.-b, gdje dobiveni niskofrekventni titraji *NF'* nisu slični titrajima *NF*, kojima je vršena modulacija. Na ovu činjenicu, koja je za prijemnu tehniku vrlo važna, osvrnut ćemo se kasnije, kad bude govora o ispravljačima s elektronkama. Što je s t r m i j a karakteristika detektora, to će v e ć e biti amplitude istosmjerne struje dobivene demodulacijom, a prema tome i veća jakost glasa u slušalicama. Tako na sl. 145.-a vidimo, da niskofrekventni titraji dobiveni kod crtkane karakteristike imaju mnogo manje amplitude, nego kod izvučene, iako su na detektor dovedeni isti titraji.



Sl. 144.



Sl. 145.

Ponavljanje

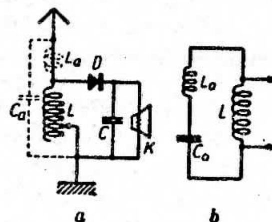
Ispravljanje moduliranih visokofrekventnih titraja naziva se *demodulacija*. Demodulacijom (na primjer kristalnim detektorom) odjeljujemo niskofrekventne titraje iz visokofrekventnog vala nosioca, pa ih u slušalicama možemo čuti. Pri tome dobivamo pulzirajuću istosmjernu struju, koja se sastoji od istosmjerne struje, koja se mijenja u taktu modulacije, i visokofrekventne struje. Prva se dade rastaviti u niskofrekventnu izmjeničnu struju i čistu istosmjernu. Ako je karakteristika ispravljača p r a v a c, niskofrekventna izmjenična struja n i j e i z o b l i č e n a. Uslijed zakrivljenosti karakteristike dolazi do i z o b l i č e n j a. Što je karakteristika strmija, to je veća jakost glasa u slušalicama.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Koju svrhu ima demodulacija? *Odgovor:* Ona mora od visokofrekventnih moduliranih titraja odijeliti nisku frekvenciju, kojom se je moduliralo. — *P.*: Kako nastaje demodulacija? *O.*: Ispravljanjem visokofrekventnih moduliranih titraja, na primjer kristalnim detektorom. — *P.*: Na koje dijelove se može rastaviti ispravljena modulirana visokofrekventna struja? *O.*: Na visokofrekventnu izmjeničnu struju, na niskofrekventnu izmjeničnu struju i na istosmjernu struju. — *P.*: Kad ispravljač radi bez izobličenja? *O.*: Kad se za ispravljanje upotrebi samo ravni dio karakteristike ispravljača. — *P.*: Kakav utjecaj ima strmina karakteristike? *O.*: Što je karakteristika strmija, to je veća jakost primljenih signala.

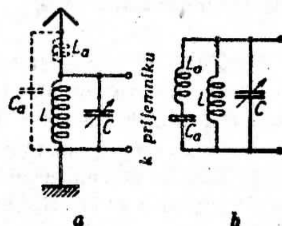
Priključivanje prijemne antene

198. — Kao što smo već vidjeli u odsjecima 131. i 132., svaka antena ima vlastiti induktivitet L_a i vlastiti kapacitet C_a. Kod prijemnih antena, koje se obično upotrebljavaju, prosječna vrijednost tih veličina je $L_a \approx 20$ μH, a $C_a \approx 200$ pF. Priključak prijemne antene na prijemnik zovemo *antenskom vezom* U najjednostavnijem slučaju ukopča se u krug antene dio zavojnice L (sl. 146.-a), pa u tom slučaju govorimo o *galvanskoj vezi*. Paralelno zavojnici L vezan je krug detektora D-C-K, koji već poznajemo sa sl. 142. Antenski krug možemo prikazati nadomjesnom shemom, kao na sl. 146.-b. Ukupni induktivitet jednak je $L + L_a$, jer su L i L_a spojeni u seriju. Prijemni krug ugođen je dakle na frekvenciju (prema Thomsonovoj jednadžbi) $f_0 = 1/[2\pi\sqrt{(L + L_a)\cdot C_a}]$. Ako antenu priključimo na drugo mjesto na zavojnici, ako dakle mijenjamo induktivitet L, prijemni titrajni krug možemo ugoditi na bilo koju frekvenciju unutar stanovitih granica određenih vrijednostima, koje imaju L, L_a i C_a. Prijemna frekvencija mora međutim biti uvijek *manja* od vlastite frekvencije antene.



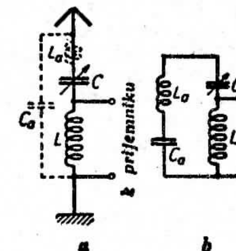
Sl. 146.

199. — Na sl. 147.-a vidimo opet jedno *galvansko* vezivanje prijemne antene, a na sl. 147.-b odgovarajuću nadomjesnu shemu. Ovdje se ugađanje vrši promjenljivim kondenzatorom C, a ne promjenljivim induktivitetom. Budući da je kapacitet antene C_a *paralelno* spojen promjenljivom kondenzatoru C, *povećava* se ukupni kapacitet na $C + C_a$, uslijed čega je čitavo područje titrajnog kruga pomaknuto prema *nižim* frekvencijama, dakle prema *većim* duljinama vala. Takav spoj naročito je pogodan za primanje *dugih valova*, ali i kod *kratkih antena* Mana je toga spoja *dvovalnost* (vidi odsjek 217), uslijed čega lako dolazi do međusobnog smetanja stanica.



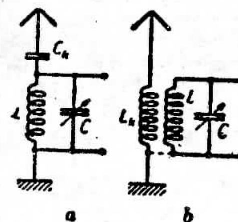
Sl. 147.

200 — Na sl. 148.-a prikazan je spoj, u kojem je induktivitet L spojen s kapacitetom za ugađanje C u *seriju*. Kapaciteti C_a i C spojeni su ovdje u *seriju* (sl. 148-b), tako da je ukupni kapacitet smanjen na $C_a \cdot C/(C_a + C)$. Time se područje ugađanja titrajnog kruga L—C pomaklo prema *višim* frekvencijama, dakle prema *kraćim* duljinama vala. (Induktivitet se doduše serijskim spajanjem induktiviteta L i L_a povećava na $L + L_a$. Time se područje pomiče prema *nižim* frekvencijama, ali je to pomicanje više nego kompenzirano smanjenjem ukupnog kapaciteta.) Ovaj spoj bit će prema tome pogodan za prijem *kraćih valova* ili kod *duljih antena*. Kod ovog spoja dvovalnosti nema.



Sl. 148.

201. — Kod *kapacitivne veze* priključuje se antena na titrajni krug L—C (sl. 149-a) preko kondenzatora za vezu C_k (20 do 100 pF). Na taj način se postizava to, da antenski kapacitet, koji je sada spojen u seriju s C_k, dolazi manje do izražaja, pa je ugađanje manje ovisno o upotrebljenoj anteni. Uz ovakvu vezu opada međutim i osjetljivost i jakost glasa kod nižih frekvencija, dakle kod duljih valova, kod kojih otpor kapaciteta C_k predstavlja već dosta veliku vrijednost. Kapacitivna veza dolazi dakle u obzir samo za veće prijemnike.



Sl. 149.

202. — Konačno na sl. 149.-b vidimo *induktivnu vezu*, koja se vrlo često upotrebljava. Izmjenični naponi, koji nastaju u zavojnici L_k, izazivaju u zavojnici L vrlo jake napone, ako je krug L—C ugođen na frekvenciju, koja se prima. Donji krajevi zavojnica L_k i L mogu se spojiti zajedno. Kako stvarni antenski krug *nije ugođen*, naziva se ovaj spoj i spojem s *aperiodskom evzom*. Taj naziv međutim ne odgovara sasvim, jer i antenski krug ima vlastitu frekvenciju određenu s L_a i C_a, a ta je, ako se uzme u obzir i induktivitet zavojnica za vezu L_k: $f_0 = 1/[2\pi\sqrt{(L_a + L_k)\cdot C_a}]$. Ako se titrajni krug L—C ugodi na ovu ili na susjedne frekvencije, bit će jakost glasa najveća. Da bi se otklonilo davanje prednosti pojedinim područjima frekvencija, to jest, ako se želi jednako primati čitavo područje, može se odustati od najpovoljnijeg ugađanja antene. *Vlastita frekvencija antene mora u tom slučaju biti niža od najniže frekvencije, koju želimo primati.* To međutim zahtijeva prilično veliki induktivitet zavojnice L_k. Računamo li s kapacitetom antene C_a od kojih 200 pF, mora za područje srednjih valova induktivitet zavojnice L_k biti oko 0,9 mH, a za područje dugih valova čak $L_k \approx 9$ mH. Vlastita frekvencija antene leži onda ispod 400 kHz, odnosno 120 kHz, dakle iznad duljina vala 750 m, odnosno 2500 m. O ostalim pojedinostima antenske veze i ugađanju prijemne antene bit će više govora kasnije.

Ponavljanje

Kod *galvanske veze* veže se antena neposredno na titrajni krug prijemnika. Kod drugog načina galvanske veze, koja je naročito prikladna za dulje valove, promjenljivi kondenzator titrajnog kruga i antenski kapacitet leži paralelno induktivitetu titrajnog kruga, pa je uslijed toga ukupni kapacitet povećan, a čitavo područje pomaknuto prema dugim valovima. Mana tog spoja je dvovalnost. Kod trećeg načina je promjenljivi kondenzator spojen s antenskim kapacitetom i induktivitetom titrajnog kruga u seriju, pa je spoj naročito pogodan za prijem kratkih valova i za duge antene. Ako se antena na prijemnik priključi preko kondenzatora, imamo *kapacitivnu vezu*. Izvede li se veza antene i prijemnika sa zavojnicom, onda imamo *induktivnu vezu*. Želimo li imati jednak prijem preko jednog čitavog područja, mora vlastita frekvencija prijemne antene biti niža od najniže frekvencije, koja za prijem dolazi u obzir.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Što razumijevamo pod antenskom vezom? *Odgovor:* Vezu prijemne antene s prijemnikom. — *P.*: Kakve smo veze dosada upoznali? *O.*: Galvansku, kapacitivnu i induktivnu vezu. — *P.*: Za što je pogodan spoj na sl. 147-a? *O.*: Za prijem dugih valova i za prijem s kratkim antenama. — *P.*: Kada upotrebljavamo spoj na sl. 148-a? *O.*: Kad želimo primati kraće valove ili kad imamo dugačku antenu. — *P.*: Kako izgleda kapacitivna i induktivna veza? *O.*: Vidi sl. 149! — *P.*: Koje su mane kapacitivne veze? *O.*: Jakost glasa opada s frekvencijom. — *P.*: Kako se kod induktivne veze može postići približno jednoličan prijem po čitavom području? *O.*: Ako se za vezu upotrebi zavojnica s velikim induktivitetom. Vlastita frekvencija antenskog kruga mora biti niža od najniže frekvencije, koju želimo primati.

Pitanja

72. Može li se kristalom kao detektorom postići demodulacija bez izobličenja?

73. Kako se može antena bez promjenljivog kondenzatora ugoditi na određenu frekvenciju?

74. Kakav utjecaj ima vlastita frekvencija antene kod induktivne veze?

Zadaci

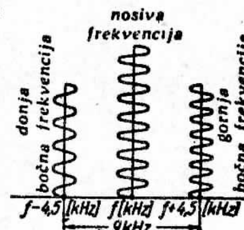
63. Prijemna antena ima induktivitet 20 μH i kapacitet 180 pF; a) na koju je frekvenciju, odnosno duljinu vala, ugođena, b) kako se mijenjaju ove vrijednosti, ako u antenski krug ukopčamo zavojnicu s induktivitetom 9 mH?

64. Prijemna antena priključena je na prijemnik u spoju prema sl. 148, a ima induktivitet 25 μH i kapacitet 250 pF. Na koju je frekvenciju ugođen prijemnik, ako je induktivitet titrajnog kruga toga prijemnika 0,2 mH, a kapacitet 400 pF?

Selektivnost

203. — Prijemnik se ugađa na neku određenu frekvenciju zato, da bi se između mnogih valova, koji dolaze do prijemne antene, mogao izabrati j e d a n i taj nesmetano primati. Za to je potrebno da se prijemnik dade o š t r o ugoditi, da se valovi ne bi međusobno smetali. Iz odsjeka 190 znamo, da svaki modulirani odašiljač isijava čitavi pojas frekvencija, te da je širina toga pojasa jednaka dvostrukoj najvišoj frekvenciji, kojom se modulira.

Iz toga slijedi, da noseće frekvencije dvaju susjednih odašiljača moraju imati u frekvencijama stanoviti razmak, da ne bi nastale međusobne smetnje. Zbog velikog broja odašiljača uglavljeno je međunarodnim ugovorima da se frekvencije dvaju susjednih odašiljača moraju razlikovati najmanje za 9000 Hz = 9 kHz. Prema tome svakom odašiljaču ostaje na raspolaganju širina pojedinog bočnog pojasa (vidi odsjek 190) od 4,5 kHz. Drugim riječima to znači, da najviši ton, kojim se modulira, ne smije biti viši od 4,5 kHz. Ovo područje je upravo toliko široko, da se može postići donekle zadovoljavajuća reprodukcija. Mnogi odašiljači rade međutim sa širim pojasom frekvencija, kojima se modulira (oko 30 do 8000 Hz), da se dobije što savršeniji prijenos glazbe ili govora. Preklapanje bočnih pojaseva mora se u tom slučaju izbjeći tako, da se frekvencije, koje pripadaju području preklapanja, odrežu u prijemniku. Radi li se međutim o prijemu jake lokalne stanice, ne treba se bojati smetnji uslijed preklapanja s bočnim pojasevima drugih stanica, pa se u prijemniku može iskoristiti čitava širina područja frekvencija, kojima se modulira. To vrijedi i za sve ostale odašiljače, koji u susjedstvu nemaju koji jaki odašiljač.

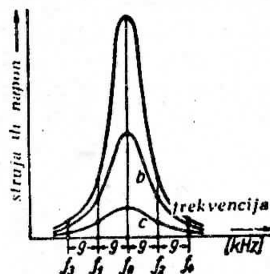


Sl. 150.

204. — Ako razmak u frekvencijama iznosi 9 kHz, može se u *području srednjih valova* od 200 do 600 m, dakle od 1500 do 500 kHz, smjestiti ukupno (1500—500) : 9 = 1000 : 9 = *najviše 111 odašiljača*. U *područje dugih valova* između 1000 i 2000 m, dakle između 300 i 150 kHz, može se prema tome smjestiti samo 150 : 9 = *najviše 17 odašiljača*. U *područje kratkih valova* od 10 do 50 m, dakle od 30000 do 6000 kHz, može se naprotiv smjestiti 24000 : : 9 = *najviše 2660 odašiljača!* Još su povoljnije prilike u području ultrakratkih valova. Kako međutim dozvoljeni broj odašiljača ne zadovoljava, daje se često odašiljačima, koji su geografski međusobno dosta udaljeni, a rade s malenom energijom, *zajednički val*. Ako se prijenosne frekvencije takvih odašiljača razlikuju, kod prijema na istom mjestu nastaju treptaji, kojima je frekvencija jednaka razlici frekvencija obaju odašiljača. Želimo li da taj treptajni ton bude nečujan, smiju se prijenosne frekvencije razlikovati najviše 15 do 20 Hz. Osim ovoga postoje i takozvani *istovalni sistemi*, kod kojih stanoviti broj odašiljača, koji su geografski međusobno blizi, radi na istom valu, ali i s istim programom.

205. — Iz svega ovoga se vidi, da se na selektivnost prijemnika moraju postaviti veliki zahtjevi, da se kod prijema jednog odašiljača ne bi čuli susjedni odašiljači. Mora se u prvom redu nastojati, da se (izuzev kod prijema lokalne stanice) upotrebom što boljeg materijala za izradu titrajnih krogova postigne što strmija krivulja rezonancije (vidi odsjek 100 i sl. 76). Na sl. 151 imamo ponovo prikazane tri krivulje rezonancije. Prva (a) je vrlo strma, te će struja, odnosno napon, a prema tome i jakost glasa, za rezonantnu frekvenciju f_0 biti mnogo veća od struje i napona, koje proizvode susjedni odašiljači na frekvencijama $f_1 = f_0 - 9$ [kHz] i $f_2 = f_0 + 9$ [kHz]. Stoga ove frekvencije ne će smetati; prijemnik će biti selektivan. Znatno je manje strma krivulja (b) (veće prigušenje zbog većih otpora gubitaka), pa s njome ne će biti moguć selektivan prijem, jer oba susjedna odašiljača, koji rade na frekvencijama $f_1 = f_0 - 9$ [kHz]

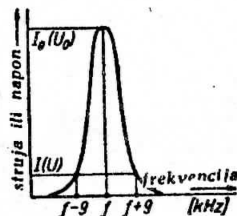
i $f_2 = f_0 + 9$ [kHz], proizvode prilično jaku struju, odnosno napon, pa će oni kod prijema probijati. Još je mnogo gore s krivuljom (c), kod koje gotovo uopće nema selektivnosti, jer kod nje probijaju č e t i r i odašiljača prenosnim frekvencijama $f_1 = f_0 - 9$ [kHz], $f_2 = f_0 + 9$ [kHz], $f_3 = f_0 - 18$ [kHz] i $f_4 = f_0 + 18$ [kHz]. Ovakvu krivulju rezonancije možemo dakle imati samo kod prijemnika, koji služi za prijem lokalne stanice.



Sl. 151.

206. — S e l e k t i v n o s t se može izraziti i b r o j č a n o: *Selektivnost nam kaže, koliko puta bi jači morao biti odašiljač udaljen 9 kHz, da se čuje istom jakošću kao odašiljač, na koji je titrajni krug prijemnika ugođen.* Iz krivulje rezonancije (uzevši kao da je simetrična) vidi se, da je selektivnost također jednaka odnosu jakosti rezonantne struje I_0, odnosno rezonantnog napona U_0 (sl. 152) odašiljača, na koji je krug ugođen, prema struji, odnosno naponu, što ga uzrokuje odašiljač udaljen 9 kHz. Ako selektivnost označimo sa s, imamo dakle:

$$s = \frac{I_0}{I} = \frac{U_0}{U} \quad . \; . \; (79)$$



Sl. 152.

Selektivnost $s = 400$ znači, dakle, da odašiljač, udaljen 9 kHz, daje na titrajnom krugu napon, koji je 1/400 izmjeničnog napona, što ga proizvodi odašiljač, na koji je dotični krug ugođen.

Ponavljanje

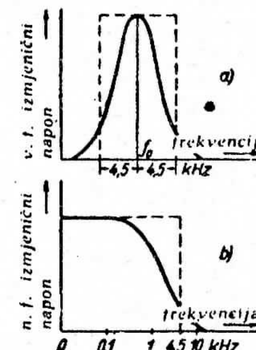
Prema međunarodnim ugovorima moraju se noseće frekvencije pojedinih odašiljača razlikovati za 9 kHz, da bi se izbjegle smetnje od međusobne interferencije. Uslijed toga je širina bočnog pojasa odašiljača ograničena na 4,5 kHz, tako da najviša frekvencija, kojom se modulira, ne smije biti iznad 4,5 kHz. Što je strmija ***krivulja rezonancije*** prijemnika, to je manja opasnost od smetnji odašiljača, koji su po frekvenciji blizu onome, koji želimo primati. Plosnata krivulja rezonancije bit će, dakle, povoljna samo za prijem lokalne stanice. *Selektivnost* nam kaže koliko puta bi jači morao biti odašiljač udaljen 9 kHz od onog odašiljača, koji primamo, pa da se može čuti jednako glasno kao ovaj.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Zašto se ne može postaviti neograničen broj odašiljača? *Odgovor:* Zato, što bi se visokofrekventni valovi, koji su modulirani, međusobno smetali, pa bi dolazilo do smetnji kod prijema. — *P.:* Kako su te poteškoće dobrim dijelom otklonjene? *O.:* Tako, što je međunarodnim ugovorima određeno, da se prenosne frekvencije pojedinih odašiljača razlikuju za 9 kHz. — *P:* Kakav nedostatak ima taj ugovor? *O.:* Taj, što najviša frekvencija modulacije može biti 4,5 kHz. — *P.:* Da li se uvijek ostaje kod te granice? *O:* Ne, jer mnogi odašiljači rade s modulacionim frekvencijama do 8 kHz. — *P.:* Na koji se način mogu otkloniti smetnje, koje nastaju uslijed preklapanja bočnih pojaseva dvaju susjednih odašiljača? *O.:* Potiskivanjem frekvencija iznad 4,5 kHz u samom prijemniku. — *P.:* Kakav

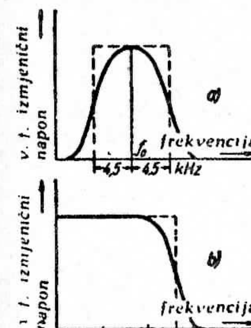
utjecaj ima krivulja rezonancije na selektivnost prijemnika? *O.:* Što je krivulja rezonancije strmija, to je prijemnik selektivniji. — *P.:* Koja je mana plosnatih krivulja rezonancije? *O.:* Propuštanje susjednih odašiljača uz onaj, koji želimo primati, a osim toga je mnogo manja jakost glasa. — *P.:* Kako se selektivnost izražava brojčano? *O.:* Selektivnost je jednaka rezonantnom naponu, odnosno rezonantnoj jakosti struje odašiljača, koji se prima, podijeljenoj s naponom, odnosno jakošću struje odašiljača, koji radi na frekvenciji 9 kHz susjedno.

207. — Od dobrog prijemnika ne tražimo samo *selektivnost* nego i *kvalitetu reprodukcije.* Na sl. 153.-a vidimo još jedamput jednu strmu krivulju rezonancije. Vidimo da je selektivnost velika, ali da će frekvencije bočnog pojasa, ukoliko su d a l j e od nosive frekvencije f_0, davati sve manje vrijednosti izmjeničnog napona. Maksimalna frekvencija u bočnom pojasu (4,5 kHz) davat će znatno manje napone od prijenosne frekvencije. Kod reprodukcije glazbe i govora to znači, da je *gornje područje frekvencija zapostavljeno,* pa reprodukcija zvuči nepriodno i muklo. Na sl. 135.-b vidimo niskofrekventne napone (odnosno jakosti glasa) u ovisnosti o frekvencijama. Zapostavljanje počinje već kod frekvencija od 0,2 kHz = 200 Hz i već kod 1 kHz = 1000 Hz poprima velike vrijednosti.

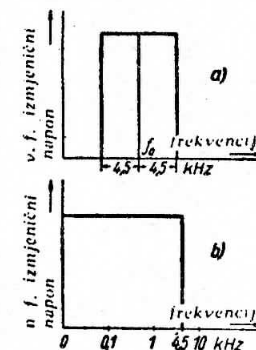


Sl. 153.

208. — Ako je krivulja rezonancije manje strma (sl. 154-a) bit će selektivnost manja, ali zato zapostavljanje viših tonova ne će biti tako jako, kao kod strmih krivulja rezonancije. Na sl. 154-b se vidi, da slabljenje dolazi tek kod frekvencija oko 1 kHz, a da ni kod frekvencija u okolini oko 4,5 kHz nije preveliko. Reprodukcija u ovom slučaju ne će više biti tako tamna, nego će zvučiti prilično prirodno. Ova razmatranja pokazuju nam dalje, da bi *savršena krivulja* rezonancije morala kod s v i h frekvencija iz područja modulacije davati jednake izmjenične napone. Najsavršenija krivulja imala bi prema tome p r a v o k u t a n o b l i k (sl. 155-a). U tom slučaju bi č i t a v o područje bilo prenošeno savršeno j e d n o l i č n o (sl. 155-b), pa ne bi dolazilo do zapostavljanja bilo kojih frekvencija. Osim toga bi pravokutna krivulja rezonancije bila u-jedno n a j p o v o l j n i j e rješenje i obzirom na s e l e k t i v n o s t. Tada bi naime za frekvencije ispod f_0 — 4,5



Sl. 154.

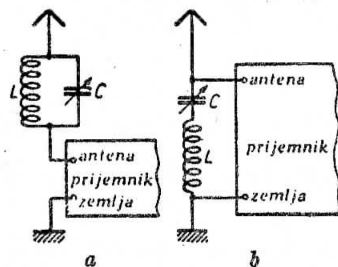


Sl. 155.

[kHz] i za frekvencije iznad $f_0 + 4,5$ [kHz] visokofrekventni napon bio jednak nuli, pa odašiljači s prijenosnom frekvencijom različitom za 9 kHz ne bi smetali.

209. — Nije teško doći do zaključka, da pravokutnu krivulju rezonancije nije moguće dobiti spajanjem zavojnice i kondenzatora. Kako ćemo međutim vidjeti kasnije, kad bude govora o pojasnim filterima, može se postići barem vrlo dobro približenje savršenoj krivulji rezonancije. S druge strane može se slabljenje viših tonova kod strmih krivulja rezonancije korigirati posebnim cevima u samom prijemniku.

210. — Kod jednostavnih prijemnika, koji imaju malo titrajnih krugova, dakle kod prijemnika s neznatnom selektivnošću, često se dešava, da je prijem dalekih stanica ometan bilo lokalnom, bilo nekom blizom jakom stanicom. Lokalna stanica probija pri tome na vrlo širokom području. Da bi se ovo *probijanje lokalne stanice* uklonilo, može se u antenu ugraditi z a p o r n i k r u g ugođen na frekvenciju lokalne stanice (sl. 156-a). Iz odsjeka 102. i 106., kao i iz jednadžbe (56), znademo, da se zaporni krug sastoji od paralelnog spoja induktiviteta L i kapaciteta C, i da u slučaju rezonancije ima vrlo veliki otpor. Ovakav zaporni krug propušta sve visokofrekventne titraje osim onih, kojima frekvencija odgovara njegovoj vlastitoj. Titraji ove frekvencije bivaju vrlo oslabljeni. Oštrina zapornog djelovanja je to veća, što zaporni krug ima manje gubitke (usporedi odsjek 106). Najbolje zaporno djelovanje može se postići tako, da se antena priključi na o d v o j a k zavojnice L, i tako nađe najpovoljnija antenska veza sa zapornim krugom. Ako se radi uvijek o istom odašiljaču koji smeta, može se zaporni krug ugoditi j e d n o m z a u v i j e k pa ga nije potrebno dirati; time se i rukovanje s prijemnikom olakšava. U mnogim prijemnicima je zaporni krug već ugrađen. Zaporni filtar može se također nabaviti gotov, pa ga u prijemnik treba samo umetnuti. Isključenje lokalne stanice može se postići „usisnim" krugom (sl. 156-b). Krug sa serijskim spojem induktiviteta L i kapaciteta C ima prema odsjeku 93. i 96. u slučaju rezonancije vrlo malen otpor. Prema tome on za titraje one frekvencije, na koju je ugođen, predstavlja kratki spoj, i odvodi ih k zemlji. *Za* ostale titraje ovakav usisni krug je znatan otpor, pa će ovi titraji ići k prijemniku mimo kruga.



Sl. 156.

Ponavljanje

Što je *krivulja rezonancije* titrajnog kruga strmija, to je veća i njegova selektivnost, ali je i to veće zapostavljanje viših frekvencija iz bočnih pojaseva. Reprodukcija glazbe i govora zvuči u tom slučaju muklo i neprirodno. Ako krivulja rezonancije ima *pravokutan oblik*, bit će s v e frekvencije bočnog pojava prenošene j e d n o l i k o, a osim toga će prijemnik s ovakvom krivuljom rezonancije biti savršeno selektivan. *Probijanje lokalne stanice* smeta

prijem udaljenih stanica, a može se otkloniti ugrađivanjem *zapornog* ili *usisnog kruga* u krug antene. Zaporni krug predstavlja za rezonantnu frekvenciju vrlo veliki otpor, a usisni krug, naprotiv, vrlo malen.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kakav utjecaj na reprodukciju ima strmina krivulje rezonancije? *Odgovor:* Što je krivulja rezonancije strmija, to više će biti zapostavljeni viši tonovi. — *P.*: Kako se ovo zapostavljanje dade umanjiti? *O.*: Tako, da se krivulji rezonancije dade plosnat oblik, dakle da se povisi prigušenje. — *P.*: Kakvu manu ima plosnata krivulja rezonancije? *O.*: Malenu selektivnost. — *P.*: Na koji se način može spojiti selektivnost s dobrom reprodukcijom? *O.*: Upotrebom titrajnih krugova s krivuljom rezonancije, koja se približava pravokutnom obliku (pojasni filtar). — *P.*: Kako se može otkloniti probijanje lokalne stanice kod prijema dalekih stanica? *O.*: Ukapčanjem zapornog ili usisnog kruga u krug antene. — *P.*: Čime se postizava dobro djelovanje zapornog kruga? *O.*: Što boljom izvedbom ovakvog kruga i o d v o j k o m na zavojnici, kojim se ovaj krug može priključiti na antenu najpovoljnije. — *P.*: Kako se ugađa krug na stanicu, koja smeta? *O.*: Zaporni krug se ugodi promjenljivim kondenzatorom, a ovo ugađanje ostaje stalno, ukoliko se radi uvijek o istom odašiljaču, koji smeta.

Pitanja

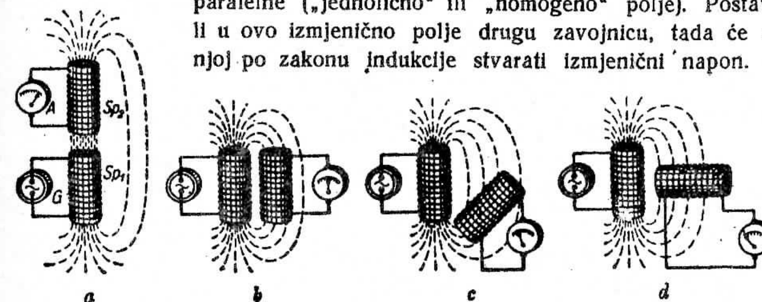
75. Zašto prijemnik za lokalnu stanicu ne mora biti jako selektivan?
76. Što možemo zaključiti iz podatka, da je selektivnost nekog prijemnika 600?
77. Na čemu se osniva djelovanje zapornog i usisnog kruga?

Zadaci

65. Neki odašiljač radi na valu 300 m i moduliran je frekvencijama do 8 kHz. Koje valno područje mora ovaj odašiljač imati na raspolaganju?
66. Mjerenje na nekom prijemniku pokazuje, da ugađanjem na neki odašiljač imamo visokofrekventni napon od 5 V, dok drugi odašiljač udaljen 9 kHz daje napon 20 mV. Kolika je selektivnost prijemnika?

Vezanje zavojnica

211. — Zavojnica, kroz koju teče izmjenična struja, proizvodi izmjenično magnetsko polje, kojemu su silnice u unutrašnjosti zavojnice približno paralelne („jednolično" ili „homogeno" polje). Postavimo li u ovo izmjenično polje drugu zavojnicu, tada će se u njoj po zakonu indukcije stvarati izmjenični napon. Ako



Sl. 157.

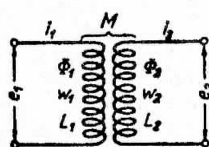
je krug ove druge zavojnice zatvoren, inducirat će se i izmjenična struja. Između obiju zavojnica dolazi do izmjene energije. Zavojnice su među-

sobno vezane m a g n e t s k o m v e z o m. EMS inducirana u drugoj zavojnici bit će to veća, što više silnica prve zavojnice protječe u smjeru osi kroz drugu zavojnicu. Sl. 157.-a prikazuje dvije zavojnice Sp_1 i Sp_2, kod kojih je međusobna veza *vrlo jaka*. Zavojnica Sp_1 priključena je na generator izmjenične struje G, dakle na izmjenični napon, dok je strujni krug zavojnice zatvoren ampermetrom A. Praktički sve silnice zavojnice Sp_1 prolaze i kroz Sp_2. Zavojnice prikazane na sl. 157.-b nisu zbog drugačijeg međusobnog položaja tako jako vezane, pa kroz drugu zavojnicu ne prolaze sve silnice prve zavojnice. I ova veza može se međutim smatrati jakom. Na sl. 157.-c vidimo naprotiv položaj, u kojem silnice prve zavojnice samo u malenom broju prolaze kroz drugu zavojnicu, pa ovdje govorimo o *slaboj* vezi. Na sl. 157.-d vidimo konačno slučaj kad zavojnice nisu vezane, jer kroz drugu zavojnicu u smjeru osi ne prolazi praktički ni jedna silnica prve zavojnice.

212. — Kod promjene jakosti struje di_1/dt nastaje u prvoj zavojnici također promjena magnetskog toka $d\Phi_1/dt$, a uslijed toga, slično kao kod samoindukcije u odsjeku 11., inducira se u drugoj zavojnici, prema odsjeku 2. i jednadžbi (14.), napon:

$$e_2 = -w_2 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} \cdot 10^{-8} = -M \cdot \frac{di_1}{dt} \text{ [V]} \quad . \; . \; (80)$$

Značenje pojedinih veličina vidi se na sl. 158. M se naziva k o e f i c i j e n t o m m e đ u s o b n e i n d u k c i j e ili *međusobnom indukcijom*, a mjeri se također u henrijima [H]. *Međusobni induktivitet dviju zavojnica ima veličinu 1 H, ako u drugoj zavojnici nastaje EMS 1 V, kad se u prvoj zavojnici jakost struje jednoliko mijenja za 1 A u jednoj sekundi.* Veličina međusobne indukcije ovisna je o dimenzijama obiju zavojnica i o njihovom međusobnom položaju. M a k s i m a l n u vrijednost M_0 postizava međusobna indukcija onda, kad su obje zavojnice vezane s a v r š e n o j a k o, to jest uz $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi$. U tom slučaju iz jednadžbe (80) i odsjeka 11. imamo:



Sl. 158.

$$e_2 = -w_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} = -w_2 \cdot \frac{d}{dt}\left(F \cdot \mu \cdot \Pi \cdot \frac{w_1 \cdot i_1}{l}\right) \cdot 10^{-8} =$$

$$= -w_2 \cdot F \cdot \mu \cdot \Pi \cdot \frac{w_1}{l} \cdot \frac{di_1}{dt} \cdot 10^{-8} = -M_0 \cdot \frac{di_1}{dt}$$

Iz toga dobivamo:

$$M_0 = \mu\Pi \cdot \frac{w_1 \cdot w_2 \cdot F}{l} \cdot 10^{-} \text{ [H]} \quad . \; . \; . \; . \; (81)$$

Dok je induktivitet L, prema jednadžbi (15), ovisan o k v a d r a t u broja zavoja, međusobna indukcija M je proporcionalna p r o d u k t u broja zavoja obiju zavojnica.

213. — Jednadžbu (81) možemo pisati i ovako:

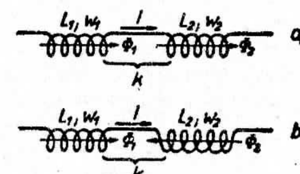
$$M_0 = \sqrt{\left(\mu\Pi \cdot \frac{w_1^2 \cdot F}{l} \cdot 10^{-8}\right) \cdot \left(\mu\Pi \cdot \frac{w_2^2 \cdot F}{l} \cdot 10^{-8}\right)}$$

Oba izraza u zagradama daju međutim prema jednadžbi (15) induktivitet L_1 i L_2 obiju zavojnica. Prema tome dobivamo da je m a k s i m a l n i međusobni induktivitet: $M_0 = \sqrt{L_1 \cdot L_2}$. Što je veza s l a b i j a, to je M m a n j i. Označimo li s k f a k t o r v e z a n j a, to jest *odnos stvarne indukcije prema maksimalnoj međusobnoj indukciji*, imamo općenito: $M = k \cdot M_0$ ili:

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad . \; . \; . \; . \; (82)$$

Za *savršenu vezu* je $k = 1$, a za zavojnice, koje *nisu vezane*, $k = 0$.

214. — Kod *serijskog spajanja induktiviteta* ukupni induktivitet L je prema odsjeku 55. jednak sumi pojedinih induktiviteta. Ovo vrijedi za slučaj, da među zavojnicama n e p o s t o j i međusobna magnetska veza. Ako međutim obje zavojnice, kojih su induktiviteti L_1 i L_2 imaju faktor vezanja k, imat ćemo u njima kod promjene jakosti struje ne samo napon indukcije, nego i napon međusobne indukcije jer prva zavojnica djeluje na drugu isto tako, kao i druga na prvu. Ako je *smjer namatanja* obiju zavojnica jednak, imat ćemo ukupnu EMS:



Sl. 159.

$$e = -L_1 \cdot \frac{di}{dt} - L_2 \cdot \frac{di}{dt} - M \cdot \frac{di}{dt} - M \cdot \frac{di}{dt} = -(L_1 + L_2 + 2M)\frac{di}{dt}$$

U k u p n i induktivitet bit će, dakle, prema jednadžbi (15):

$$L = L_1 + L_2 + 2M = L_1 + L_2 + 2k\sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

Ako je međutim *smjer namatanja obiju zavojnica protivan* (sl. 159-b), oba međusobna induktiviteta djelovat će p r o t i v n o, pa ćemo imati:

$$L = L_1 + L_2 + 2M = L_1 + L_2 - 2k\sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

Ako je $k = 1$, bit će ukupni induktivitet ovih dviju zavojnica spojenih u seriju, kad su namatane u i s t o m s m j e r u, najveći. Ako je osim toga $L_1 = L_2$ bit će $L_0 = 4\,L_1$. Ako je $k = 0$, dobivamo $L = L_1 + L_2$, odnosno $L = 2L_1$, kako smo to imali i u odsjeku 55. Ako je smjer namatanja p r o t i v a n, za $k = 1$ imat ćemo n a j m a n j u vrijednost za L, naime $L = 0$. Za $k = 0$ i $L_1 = L_2$ bit će opet $L = 2L_1$. To uostalom i mora biti tako, jer je kod zavojnica, koje nisu magnetski vezane, svejedno, u kojem su smjeru namatane.

Sva ova razmatranja od velikog su značenja za konstrukciju p r o m j e n l j i v i h induktiviteta („variometar"), a isto tako za konstrukciju z a v o j n i c a b e z i n d u k t i v i t e t a. Kod *variometra* se radi o dvije zavojnice, koje su spojene u seriju, a jedna se prema drugoj mogu pomicati tako, da su magnetska polja istog ili protivnog smjera. Zbog promjene faktora vezanja, koji je time uvjetovan, induktivitet variometra može se mijenjati kontinuirano (neprekidno) između vrijednosti $L_1 + L_2 + 2k\sqrt{L_1 \cdot L_2}$ i vrijednosti $L_1 + L_2 - 2k\sqrt{L_1 \cdot L_2}$. *Zavojnice bez induktiviteta* (a isto tako i

žicom namatani otpornici bez induktiviteta, koji se upotrebljavaju za mjerenja) mogu se dobiti tako, da se žica, koju želimo namatati, u polovini duljine previje i onda namata dvožilno („bifilarno" namatanje). Tada kroz čitavu žicu teče ista struja, ali u svakoj polovici p r o t i v n o g smjera, te se djelovanja obiju polovica poništavaju. Zavojnica bez induktiviteta može se načiniti i tako, da se preko jedne zavojnice namota još jedna isto takva, ali u protivnom smjeru.

Ponavljanje

Ako magnetsko polje jedne zavojnice prolazi kroz unutrašnjost druge zavojnice, koja se nalazi u blizini, bit će obje zavojnice *vezane magnetski*. Prema međusobnom položaju zavojnica jakost veze bit će različita. Vezane zavojnice nemaju samo vlastiti induktivitet L_1 i L_2, nego između njih postoji i stanoviti *međusobni induktivitet* M, koji se također mjeri u henrijima. Međusobna indukcija proporcionalna je produktu broja zavoja obiju zavojnica. Kod savršeno jake veze je $M = \sqrt{L_1 \cdot L_2}$. Ako s k označimo *faktor vezanja*, dakle odnos stvarnog induktiviteta prema najvećem mogućem međusobnom induktivitetu, onda je $M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$. Spojimo li dvije zavojnice, koje su magnetski vezane, u seriju, bit će ukupni induktivitet u slučaju, da su obje namatane u i s t o m smjeru: $L = L_1 + L_2 + 2k\sqrt{L_1 \cdot L_2}$, a ako je smjer namatanja p r o t i v a n: $L = L_1 + L_2 - 2k\sqrt{L_1 \cdot L_2}$. Ova činjenica se iskorištava kod konstrukcije zavojnica s kontinuirano promjenljivim induktivitetom, to jest kod *variometara*, a isto tako i kod konstrukcije *zavojnica bez induktiviteta*, koje se namataju bifilarno.

Pitanja i odgovori

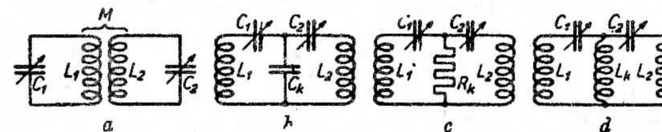
Pitanje: Što razumijevamo pod magnetskom vezom dviju zavojnica? *Odgovor:* Pojavu, da magnetske silnice jedne zavojnice prolaze kroz unutrašnjost druge zavojnice: — *P.*: O čemu je ovisna jakost veze? *O.*: O međusobnom položaju zavojnica; što više silnica jedne zavojnice prolazi kroz unutrašnjost druge, to je veza jača. — *P.*: Kada veze uopće nemamo? *O.*: Ako zavojnice stoje međusobno okomito. — *P.*: Što se razumijeva pod međusobnom indukcijom? *O.*: Međusobna indukcija jednaka je EMS, koju prva zavojnica proizvodi u drugoj u slučaju, da se jakost struje u prvoj zavojnici jednoliko mijenja za 1 A u vremenu od 1 s. — *P.*: Kada je međusobna indukcija najveća? *O.*: Onda, kad su obje zavojnice savršeno jako vezane, a tada je $M = \sqrt{L_1 \cdot L_2}$. — *P.*: Što nam pokazuje faktor vezanja? *O.*: Odnos stvarne međusobne indukcije prema najvećoj međusobnoj indukciji. — *P.*: Kolika je međusobna indukcija kod bilo kakvog faktora vezanja? *O.*: $M = k\sqrt{L_1 \cdot L_2}$. — *P.*: Koliki je ukupni induktivitet zavojnica, koje su magnetski vezane i spojene u seriju? *O.*: On je: $L = L_1 + L_2 \pm 2k\sqrt{L_1 \cdot L_2}$, već prema tome, da li su zavojnice namatane u istom ili protivnom smjeru.

Vezanje titrajnih krugova

215. — Dok smo u prošlim odsjecima govorili o magnetskoj vezi zavojnica, sada ćemo se pozabaviti vezanjem titrajnih krugova. Razlikujemo (sl. 160.) *induktivnu, kapacitivnu, galvansku* i *induktivno-galvansku* vezu. ***Faktor vezanja*** k dan je uvijek s:

$$k = \frac{X_k}{\sqrt{X_1 \cdot X_2}} \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (83)$$

Ovdje je X_k impedancija, koja je zajednička za oba titrajna kruga, a X_1, odnosno X_2, impedancija prvog, odnosno drugog titrajnog kruga.



Sl. 160.

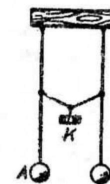
a) *Induktivna veza* (sl. 160-a): Oba titrajna kruga L_1—C_1 i L_2—C_2 vezana su zajedničkim međusobnim induktivitetom M. Budući da je prema jednadžbi (16) $X_k = \omega M$, $X_1 = \omega L_1$, $X_2 = \omega L_2$, dobivamo iz jednadžbe (83): $k = M/\sqrt{L_1 \cdot L_2}$.

b) *Kapacitivna veza* (sl. 160-b): Ovdje vezu između oba kruga čini električko polje zajedničkog kondenzatora C_k. Prema jednadžbi (23) je $X_k = 1/\omega C_k$. Ukupni kapacitet pojedinog titrajnog kruga sastoji se od serijskog spoja dvaju kapaciteta, pa je prema odsjeku (67): $C' = C_1 \cdot C_k / (C_1 + C_k)$, a $C'' = C_2 \cdot C_k / (C_2 + C_k)$, a prema jednadžbi (23): $X_1 = (C_1 + C_k)/\omega B_1 \cdot C_k$; $X_2 = (C_2 + C_k)/\omega C_2 \cdot C_k$. Uvrstimo li ove vrijednosti u jednadžbu (83) dobivamo: $k = \sqrt{C_1 \cdot C_2/(C_1 + C_k)(C_2 + C_k)}$.

c) *Galvanska veza* (sl. 160-c): Ovdje je veza zajednički radni otpor R_k. Ako su R_1 i R_2 radni otpori titrajnih krugova, onda je prema jednadžbi (83): $k = R_k / \sqrt{(R_1 + R_k)(R_2 + R_k)}$. Za vrlo malene vrijednosti R_1 i R_2 je $k \approx 1$. Radni otpor R_1 leži paralelno titrajnim krugovima, pa ovi pod stanovitim okolnostima mogu biti jako prigušeni.

d) *Induktivno-galvanska veza* (sl. 160-d): u ovom slučaju su oba kruga međusobno vezana zajedničkim induktivitetom L_k. Kako su induktiviteti L_1 i L_k, odnosno L_2 i L_k spojeni u seriju, bit će $X_k = \omega L_k$, $X_1 = \omega(L_1 + L_k)$, $X_2 = \omega(L_2 + L_k)$, pa je prema jednadžbi (83: $k = L_k / \sqrt{(L_1 + L_k)(L_2 + L_k)}$.

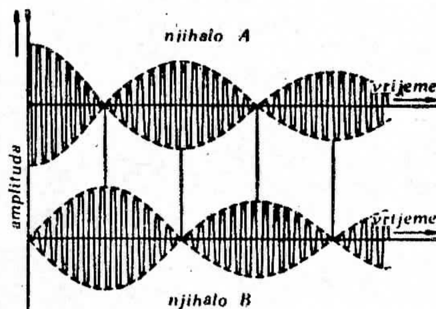
216. — Dok je veza između titrajnih krugova *dovoljno slaba*, može svaki pojedini titrajni krug titrati neovisno. Ako pomoću promjenljivih kondenzatora C_1 i C_2 oba kruga ugodimo na istu frekvenciju, prenosit će se titraji iz titrajnog kruga L_1—C_1 i kod slabe veze vrlo jako na drugi titrajni krug. Ovdje je isto kao i kod zvuka: Stoje li dvije posve jednake glazbene viljuške jedna do druge, i ako jednu od njih pobudimo na titranje, i druga će davati zvuk. Ako su međutim titrajni krugovi dosta jako vezani, nastupit će druge okolnosti. Zbog međusobnog povratnog djelovanja ne će sada titrajni krugovi titrati svojom prvotnom vlastitom frekvencijom. Ovu na prvi pogled neobičnu pojavu protumačit ćemo najprije jednim *primjerom iz mehanike:* Objesimo dva jednako dugačka njihala A i B (sl. 161) i povežemo ih „utegom za vezu" K. Zanjišimo njihalo A nalijevo! Ono će se početi njihati i podignut će nešto uteg K, koji će povući njihalo B. Uslijed toga će se i njihalo,



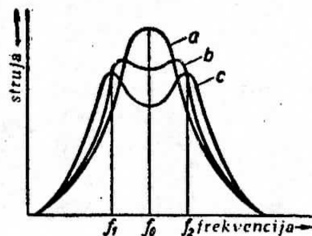
Sl. 161.

B početi njihati, iako nešto kasnije od njihala *A*. Energija, koju njihalo *A* daje njihalu *B*, da bi se ono zanjihalo, za njihalo *A* je izgubljena. Nakon nekoliko njihaja, kojih je broj ovisan o težini utega za vezu *K*, predat će njihalo *A* svu svoju energiju njihalu *B*. U tom momentu će njihalo *A* mirovati, a njihalo *B* će izvoditi titraje s amplitudom, koja je jednaka amplitudi *A* u početku titranja. Nakon toga se čitava igra ponavlja, samo sada njihalo *B* preuzima ulogu njihala *A*. Kad se njihalo *A* opet raznjiše do kraja, njihalo *B* će mirovati, i t. d. Na sl. 162. vidimo grafički prikaz toga procesa. Zbog trenja i otpora zraka past će amplitude titraja konačno na nulu; imamo dakle p r i g u š e n o titranje. Što je slabija veza između njihala, to će biti potrebno duže vrijeme, da se energija prenese s jednog njihala na drugo.

217. — Posve iste prilike imamo i kod vezanih e l e k t r i č k i h titrajnih krugova. Kako možemo vidjeti na sl. 162., svako njihalo ima *treptanje* (vidi odsjek 191 i sl. 144). Budući da treptaji nastaju uvijek superpozicijom titraja, kod kojih je razlika u frekvenciji malena, možemo doći do vrlo važnog zaključka: *Ako imamo dva titrajna kruga ugođena na istu frekvenciju f_0, a međusebno su dosta jako vezani, nestaje vlastita frekvencija f_0. Umjesto vlastite frekvencije u oba se titrajna kruga pojavljuju titraji dviju novih frekvencija f_1 i f_2, od kojih je jedna viša, a druga niža od frekvencije f_0!* Što je veza jača, to se f_1 i f_2 međusobno više razlikuju, a to je i njihova razlika od f_0 veća. U isto vrijeme s porastom razlike između f_1 i f_2 raste i frekvencija treptaja f_1—f_2. Nove frekvencije f_1 i f_2 nazivaju se v e z n e f r e k v e n c i j e, a duljine valova, koje im odgovaraju, v e z n e d u l j i n e v a l o v a. *Dvovalnost*, o kojoj smo govorili već u odsjeku 199., može imati povoljno i nepovoljno djelovanje. Postojanje dvovalnosti možemo ustanoviti tako da nacrtamo dijagram struje koja teče u drugom titrajnom krugu L_2—C_2 (sl. 160), u ovisnosti o frekvenciji, to jest, da nacrtamo krivulju rezonancije. Dobit ćemo krivulje, koje vidimo na sl. 163. Krivulja *a* vrijedi za *vrlo slabu* vezu titrajnih krugova i kod nje nemamo pojave dvovalnosti. Za *jaču* vezu vrijedi krivulja *b*, a za *vrlo jaku* vezu krivulja *c* Ova posljednja pokazuje naročito lijepo obje frekvencije f_1 i f_2. Vidimo da u ovom slučaju ne može biti ni govora o ugađanju titrajnog kruga na neku stanovitu frekvenciju, jer i susjedne frekvencije dolaze vrlo jako do izražaja. U slijedećim poglavljima vidjet ćemo, međutim, kolike velike prednosti ima ova pojava.



Sl. 162.



Sl. 163.

Ponavljanje

Električki titrajni krugovi mogu biti međusobno vezani *induktivno*, *kapacitivno*, *galvanski* i *induktivno-galvanski*. Kod s l a b e veze zadržava se vlastita frekvencija vezanih titrajnih krugova. Ako je međutim veza dovoljno j a k a, vlastita frekvencija se gubi. Iako su ugođeni na istu frekvenciju, mjesto vlastite frekvencije imamo u titrajnim krugovima po dvije nove frekvencije, od kojih je jedna niža, a druga viša od vlastite frekvencije. Uslijed ove „dvovalnosti" nije više moguće ugađati krugove na neku određenu frekvenciju, jer krivulja rezonancije u blizini rezonantne frekvencije ima dvije grbe, koje su slabije ili jače istaknute, već prema veličini faktora vezanja.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kakve načine vezanja razlikujemo? *Odgovor:* Induktivni, kapacitivni, galvanski i induktivno-galvanski način vezanja. — *P.*: Kako se faktor vezanja dvaju titrajnih krugova može općenito izračunati? *O.*: Faktor vezanja jednak je odnosu impedancije zajedničke za oba titrajna kruga prema kvadratnom korijenu produkta impedancija obaju titrajnih krugova. — *P.*: Kakvo djelovanje na dva titrajna kruga, ugođena na istu frekvenciju, ima jaka veza? *O.*: Titrajni krugovi gube svoju prvotnu vlastitu frekvenciju, a njezino mjesto zauzimaju dvije nove frekvencije. — *P.*: Kako se može pokazati postojanje ovih dviju frekvencija? *O.*: Tako da se nacrta krivulja rezonancije vezanih titrajnih krugova, iz koje se vidi, da iznad i ispod rezonantne frekvencije postoje na krivulji dvije grbe. — *P.*: Kako smo objašnjavali ovu pojavu? *O.*: Mehaničkom usporedbom s dva njihala jednake duljine.

Pitanja

78. Kakva je ovisnost induktiviteta, odnosno međusobnog induktiviteta, dviju vezanih zavojnica o broju zavoja?

79. Koji najveći induktivitet možemo postići vezom dviju zavojnica?

80. Nacrtaj spojeve za četiri načina vezanja titrajnih krugova, o kojima se govorilo!

81. Zašto kod jake veze dvaju titrajnih krugova nastaju dvije nove frekvencije?

Zadaci

67. Dvije zavojnice s induktivitetom 0,1 mH i 0,3 mH namotane su na zajednički nosač i spojene u seriju. Koliki je ukupni induktivitet, ako su zavojnice motane u istom smjeru, a koliki, ako su motane u protivnom smjeru; faktor vezanja u oba slučaja neka je 80%?

68. Koliki se najveći induktivitet može postići vezom dviju zavojnica s induktivitetom 10 H?

69. Dva titrajna kruga s induktivitetom po 0,5 mH i jednakim kapacitetom po 200 pF vezani su: a) zajedničkim induktivitetom od 0,1 mH, b) kapacitetom od 5.000 pF. Koliki je u oba slučaja faktor vezanja?

218. Kako pokazuju opširna matematička razmatranja, u koja se ovdje ne ćemo upuštati, mogu se obje frekvencije (vidi odsjek 217) izračunati iz slijedećih jednadžbi:

$$f_1 = \frac{f_0}{\sqrt{1+k}}; f_2 = \frac{f_0}{\sqrt{1-k}} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (84)$$

Ovdje je *k* opet faktor vezanja, a f_0 zajednička rezonantna frekvencija za oba titrajna kruga. Pomoću jednadžbe (64) dobivamo iz jednodžbe (84) za duljine vala izraze: $\lambda_1 = \lambda_0 \cdot \sqrt{1+k}$, a $\lambda_2 = \lambda_0 \cdot \sqrt{1-k}$. Strogo uzevši trebalo bi

u ovu jednadžbu za k uvrstiti vrijednost $k' = \sqrt{k^2 - (\vartheta_1 - \vartheta_2/2\pi)^2}$. k' *je stupanj vezanja*, a ϑ_1 i ϑ_2 logaritmički dekrement prigušenja obaju titrajnih krugova. Ako je, kao što je to većinom slučaj, $(\vartheta_1 - \vartheta_2)^2$ maleno prema $(2\pi)^2$, tada je $k' \approx k$. Faktor vezanja k može se lako izračunati iz frekvencija, odnosno duljina vala, koje nastaju vezanjem.

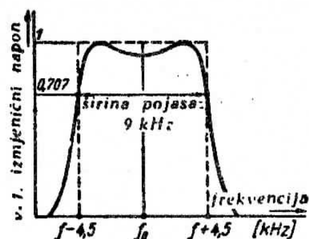
219. — Sada možemo razumjeti, zašto kod spoja na sl. 147. nastupa dvovalnost. Ovdje je naime antenski krug $L_a - C_a$ čvrsto vezan s krugom prijemnika $L - C$, a induktivitet L zajednički je za oba titrajna kruga. Ako je ulazna frekvencija f_a antenskog kruga jednaka vlastitoj frekvenciji f_0 titrajnog kruga prijemnika, istaknut će se dvovalnost naročito jako. Za $f_0 = 800$ kHz i $k = 0{,}5$ dobivamo onda iz jednadžbe (84) dvije frekvencije: $f_1 \approx 653$ kHz i $f_2 \approx 1130$ kHz. Prijemnik je prema tome istodobno ugođen na obje frekvencije f_1 i f_2, pa kod prijema frekvencije f_1 može smetati odašiljač, koji radi na frekvenciji f_2, i obrnuto.

220. — Imamo li dva titrajna kruga, koji nisu dovoljno slabo vezani, nastupit će osim spomenute dvovalnosti također i pojačano *prigušenje* uslijed povratnog djelovanja drugog titrajnog kruga na prvi. Radni otpor R_i prvog titrajnog kruga prividno se naime povećava za iznos R_k. Ako indeks 1 označuje ono, što pripada prvom krugu, a indeks 2 ono, što se odnosi na drugi krug, tada detaljnijim računom za dodatnu vrijednost radnog otpora kod induktivne veze dobivamo:

$$R_k = \frac{\omega_1^2 \cdot M^2 \cdot R_2}{R_2^2 + \left(\omega_1 L_2 - \frac{1}{\omega_1 \cdot C_2}\right)^2}$$

U slučaju rezonancije, dakle za $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$, bit će zbog $\omega_0 L_2 = 1/\omega_0 C_2$ (vidi odsjek 92). $R_k = \frac{\omega_0^2 M^2}{R_2} = \frac{\omega_0^2 k^2 L_1 L_2}{R_2}$

221. — Dvovalnost donosi međutim i velike prednosti. Pogledajmo još jedamput krivulju rezonancije b na sl. 163. Možemo vidjeti, da ona jednolično obuhvata prilično široko područje frekvencija. U odsjeku 208. i 209. postavili smo zahtjev, da krivulja rezonancije titrajnih krugova kod prijemnika bude što sličnija savršenoj krivulji rezonancije, da ima dakle pravokutan oblik. U tom slučaju prenosile bi se jednolično sve frekvencije iz područja frekvencija, kojima se modulira, a usto bi kvaliteta reprodukcije bila spojena s velikom selektivnošću. Približno savršenu krivulju rezonancije možemo dobiti upotrebom dvaju vezanih titrajnih krugova, ugođenih na istu frekvenciju. Faktor vezanja ne smije pri tome biti ni prevelik ni premalen. Ovakav uređaj naziva se pojasnim filtrom. Pojasni filtar je kod gradnje modernih prijemnika vrlo važan. Na sl. 164. vidimo oblik krivulje rezonancije pojasnog filtra, a na istoj slici je crtkano prikazana i savršena krivulja rezonancije. Može se vidjeti, da će čitavo područje od $\pm$ 4,5 kHz biti jednolično reproducirano, i da bokovi krivulja padaju strmo.



Sl. 164.

Strmina bokova može se još povećati, ako se nekoliko ovakvih pojasnih filtara spoji u seriju. Uslijed toga međutim postaje sedlo krivulje rezonancije dublje, te su niži tonovi nešto zapostavljeni. Zato se preporuča, da se u ovakvim slučajevima ne grade titrajni krugovi s vrlo malenim gubicima. S povećavanjem broja pojasnih filtara dolazimo sve bliže idealnom pravokutnom obliku krivulje rezonancije.

Praktičko izvođenje pojasnih filtara, kod kojih međusobna veza može biti izvedena na razne načine, nije jednostavna stvar. Zavojnice obaju titrajnih krugova moraju se postaviti u određenoj udaljenosti jedna od druge, da bi se dobio najpovoljniji faktor vezanja. Osim toga mora se paziti i na to, da ne dođe do nepoželjnih veza između titrajnih krugova. Konstruktivne detalje o pojasnim filtrima vidjet ćemo kasnije, kad budemo govorili o prijemnicima.

Ponavljanje

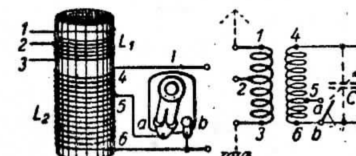
Ako imamo dva titrajna kruga, koji su dosta čvrsto vezani i ugođeni na istu frekvenciju f_0, njihova krivulja rezonancije imat će dvije grbe koje odgovaraju frekvencijama $f_1 = f_0/\sqrt{1 + k}$ i $f_2 = f_0/\sqrt{1 - k}$. Iz ovih jednadžbi možemo izračunati nepoznati faktor vezanja. Zbog povratnog djelovanja drugog titrajnog kruga na prvi povećava se prigušenje prvoga. Radi dvovalnosti se može dobiti krivulja rezonancije koja se približuje idealnoj krivulji rezonancije. Ova činjenica se iskorišćuje za gradnju pojasnih filtara. Upotrebom *pojasnog filtra* umjesto običnog titrajnog kruga dobiva se dobra reprodukcija glazbe i govora uz veliku selektivnost.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kako se može izračunati faktor vezanja dvaju titrajnih krugova ugođenih na istu frekvenciju, ako su nam poznate frekvencije f_1 i f_2, na kojima oni titraju, kad su vezani? *Odgovor:* Iz jednadžbi $f_1 = f_0/\sqrt{1 + k}$ i $f_2 = f_0/\sqrt{1 - k}$. — *P.*: Koje su mane jake veze dvaju titrajnih krugova? *O.*: Dvovalnost, koja može dovesti do smetnji; osim toga dolazi do pojačanog prigušenja veznih titraja. — *P.*: Koje su prednosti dvovalnosti? *O.*: Dvovalnost omogućuje konstrukciju pojasnih filtara. — *P.*: Što je pojasni filtar? *O.*: U najjednostavnijem slučaju to su dva međusobno vezana titrajna kruga ugođena na istu frekvenciju. — *P.*: Kakve prednosti ima pojasni filtar? *O.*: Ima krivulju rezonancije, koja se kod ispravno odabrane veze približava idealnoj (pravokutnoj) krivulji rezonancije. — *P.*: Zašto je ovakva krivulja poželjna? *O.*: Ona uz veliku selektivnost omogućuje i dobru kvalitetu reprodukcije.

Praktično izvođenje sredstava za ugađanje

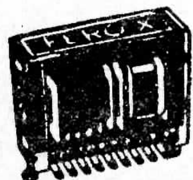
222. — Važnija svojstva i izvedbene oblike sredstava za ugađanje, dakle zavojnica i promjenljivih kondenzatora, upoznali smo već u odsjeku 46., 47., 48., 61. i 62. pa će sada biti dovoljno da se ograničimo samo na neke dopune. Na sl. 165. vidimo dvije zavojnice s induktivitetom L_1 i L_2 magnetski vezane tako, što su namotane na zajednički nosač. Ovdje se radi o takozvanom visokofrekventnom transformatoru bez željezne jezgre. Za-



Sl. 165.

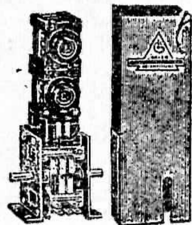
vojnica za *antensku vezu* L_1 ima tri priključka, *1, 2, 3*, pa se može odabrati najpovoljniji. Zavojnica L_2 s promjenljivim kondenzatorom *C tvori titrajni krug prijemnika*, koji se dade ugoditi na željenu frekvenciju. Zavojnica L_2 se sastoji od dva dijela *4—5* i *5—6*. Dio *4—5* s promjenljivim kondenzatorom *C* čini titrajni krug za područje srednjih valova (200 do 600 m). Kad se prima na ovom području, dio *5—6* se kratko spaja preklopcem, što znači da klizač ovog preklopca spaja kontakte *a—b*, uslijed čega se dio *5—6*, koji ima oko 3 puta više zavoja, nego dio *4—5*, iskapča. Ako se preklopac otvori, onda je u titrajni krug ukopčan č i t a v induktivitet *4—6*, pa je tada titrajni krug sposoban za prijem na području dugih valova (1000 do 2000 m).

223. — Na sl. 166. (lijevo) vidimo jedan moderni visokofrekventni transformator, koji za razliku od onoga na sl. 165. ima *visokofrekventnu željeznu jezgru* (visokofrekventna željezna jezgra se na shemama označuje c r t k a n o m linijom). Dimenzije ovakvog transformatora su samo 55×20×45 mm; on je dakle jedva nešto veći od kutije šibica! Ovakav transformator ima vrlo maleno prigušenje, vrlo maleno rasipno polje, jer su magnetske silnice uslijed upotrebe jezgre zatvorenog oblika zatvorene. I ovdje je L_1 antenska zavojnica s dva odvojka, L_2 zavojnica titrajnog kruga prijemnika, koja se može prekopčati na područje srednjih i dugih valova, a L_3 služi za povratnu vezu (reakciju) kod prijemnika s elektronkama. Podjelom namotaja u više plosnatih zavojnica kapacitet je znatno smanjen. Same zavojnice namotane su visokofrekventnom pletenicom, uslijed čega su gubici maleni. Pojedini izvodi se završavaju na priključnoj pločici, koja također ima malene gubitke, jer je od trolitula. Ovakav visokofrekventni transformator ima usprkos manjim dimenzijama mnogo bolja svojstva od transformatora bez jezgre.

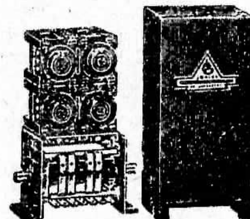


Sl. 166.

224. — Iako je rasipno polje modernih visokofrekventnih transformatora vrlo maleno, kod gradnje osjetljivih prijemnika može doći do toga, da se pojedini krugovi uslijed rasipnih veza ili preko drugih dijelova međusobno smetaju. Da radi toga ne bismo morali pojedine transformatore jedan od drugog previše udaljivati, postavljaju se oni u z a š t i t n e l o n c e (većinom od aluminija), koji su sa svih strana zatvoreni. Jedan ovakav lonac vidimo na sl. 167. (desno). Sam transformator, za koji je ovaj zaštitni lonac građen, sličan je po spoju onome na sl 166, samo je spojen u cjelinu s odgovarajućim preklopcem za biranje valnog područja. Na sl. 168. vidimo *pojasni filtar* slične izvedbe (dimenzije 75 × 45 × 135 mm)

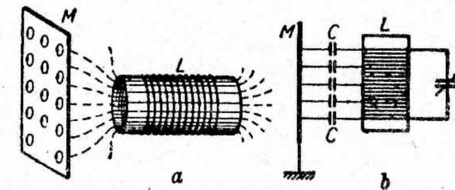


Sl, 167.



Sl. 168.

namotan opet visokofrekventnom pletenicom na željeznoj jezgri i spojen u cjelinu s odgovarajućim preklopcem. Djelovanje m a g n e t s k o g ili i n d u k t i v n o g o k l a p a n j a osniva se na činjenici, da magnetske silnice zavojnice L (sl. 169-a) induciraju u bližim metalnim stijenama *M vrtložne struje*. Uslijed toga po poznatom Lenzovom zakonu, koji kaže da inducirana struja ima uvijek takav smjer, da njeno magnetsko polje nastoji oslabiti polje, koje je struju uzrokovalo, nastaje magnetsko p r o t u p o l j e, koje oslabljuje prvotno polje već u malenoj udaljenosti od zaštitnih stijena. Oklapanje međutim neznatno smanjuje induktivitet zavojnice a povećava prigušenje, što djeluje štetno na oblik krivulje rezonancije. Razlog su tome vrtložne struje u stijenama za oklapanje koje ustvari predstavljaju gubitak energije. Da bi se to izbjeglo, potrebno je da lonci za oklapanje budu dosta veliki. U većini slučajeva dovoljno je, da udaljenost stijena lonca od zavojnice bude jednaka polumjeru zavojnice.



Sl. 169.

225. — Svaka zavojnica, isto kao i svaki drugi dio prijemnika, ima prema okolnim dijelovima stanoviti, makar i maleni *kapacitet* uzrokovan rasipanjem silnica električkog polja. Takve kapacitete nazivamo r a s i p n i m kapacitetima. Njihovo štetno djelovanje (sl. 169.-b) može se ukloniti u z e m l j e n i m oklopima od aluminija, bakra i t. d. Na taj način dolazimo do e l e k t r i č k o g ili k a p a c i t i v n o g o k l a p a n j a, koje sprečava rasipanje električkih silnica. U modernim prijemnicima se osim zavojnica, transformatora i promjenljivih kondenzatora oklapaju i svi drugi dijelovi, i to tako, da se postavljaju na *metalnu šasiju*, koja je spojena sa zemljom. Na taj način mogu se rasipne električke i magnetske veze svesti na neškodljivu veličinu, a pri tome dimenzije prijemnika mogu biti dovoljno malene.

Ponavljanje

Visokofrekventni transformator se sastoji u najjednostavnijem slučaju od antenske zavojnice s odvojcima i zavojnice za titrajni krug prijemnika, koja se pomoću *preklopca* dade djelomično kratko spojiti. Na taj način se omogućuje prijelaz iz područja srednjih na područje dugih valova jednostavnim okretanjem valnog preklopnika. Upotrebom visokofrekventnih željeznih jezgara mogu se dimenzije ovakvih transformatora znatno smanjiti, uz istodobno smanjenje rasipanja. Rasipanje električkih i magnetskih silnica može se otkloniti *oklapanjem* transformatora, zavojnica, promjenljivih kondenzatora i t. d., a pri tome je potrebno da dimenzije lonaca za oklapanje budu dovoljno velike, da bi se izbjegli gubici. Rasipne veze pojedinih dijelova prijemnika mogu se znatno smanjiti gradnjom prijemnika na metalnoj šasiji, koja se uzemljuje.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Čemu služi visokofrekventni transformator? *Odgovor:* Prijenosu visokofrekventnih titraja s jednog titrajnog kruga na drugi. — *P.*: Kako se može postići prijelaz iz područja srednjih u područje dugih valova? *O.*: Pomoću valnog preklopnika, kojim se dio zavojnice titrajnog kruga prijemnika spaja kratko; time se umanjuje induktivitet zavojnice. — *P.*: Čime se posebno ističu moderni visokofrekventni transformatori? *O*: Namotajem od visokofrekventne pletenice, koji je izveden u obliku podijeljenog plosnatog namotaja, zatim željeznom jezgrom i nemetalnim dijelovima od materijala s malenim električkim gubicima. — *P.*: Kako dolazi do rasipnih veza? *O.*: Magnetske i električke silnice transformatora, zavojnica, kondenzatora i t. d. ne ograničavaju se samo na dotične dijelove, nego prelaze i na ostale dijelove, koji su im u blizini. — *P.*: Kako se mogu umanjiti ove rasipne veze? *O.*: Oklapanjem ovakvih dijelova metalnim oklopima i izgradnjom prijemnika na metalnoj šasiji.

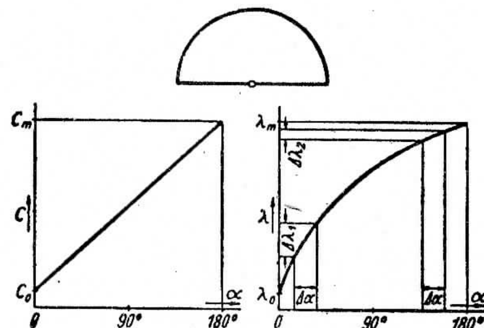
Pitanja

82. Kako se vrši ugađanje pojasnog filtra na željenu frekvenciju?
83. Nacrtaj shemu visokofrekventnog transformatora, kod kojeg postoji mogućnost prekapčanja?
84. Koja je svrha magnetskog, odnosno električkog oklapanja pojedinih dijelova?

Zadaci

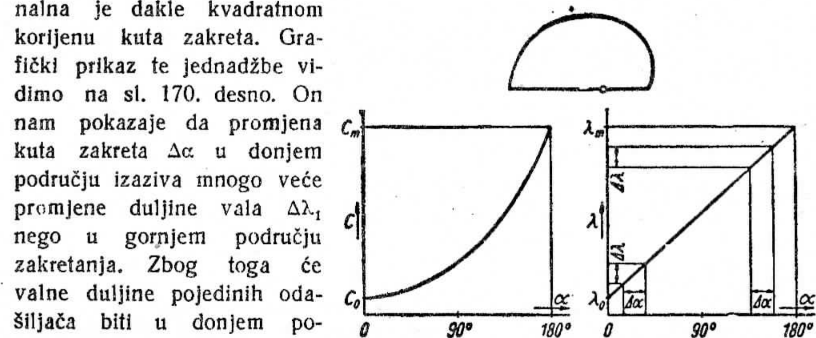
70. Mjerenja pokazuju da jedna od frekvencija, koje su nastale vezom dvaju titrajnih krugova ugođenih na istu frekvenciju od 800 kHz, iznosi 760 kHz. Koliki je faktor vezanja i kolika je druga frekvencija?
71. Imamo dva međusobno vezana titrajna kruga ugođena na istu frekvenciju, a faktor vezanja je 100%. Kako će daleko biti jedna od druge obje frekvencije, koje se dobivaju tom vezom?
72. Dva titrajna kruga s induktivitetima po 0,1 mH ugođeni su na kružnu frekvenciju 10^7. Induktivni faktor vezanja je 1%. Pita se: a) kolike će biti obje frekvencije, koje se dobivaju tom vezom; b) koliko će biti povećanje radnog otpora prvog titrajnog kruga, ako je radni otpor drugog kruga 10 Ω?

226. — U odsjeku 61. i 62. upoznali smo se već s gradnjom *promjenljivih kondenzatora*. Sada ćemo pogledati, kakav utjecaj na ugađanje titrajnih krugova ima *oblik* ploča promjenljivog kondenzatora. Najstariji promjenljivi kondenzatori imali su p o l u k r u ž n e p l o č e (sl. 170 gore). Oni se još i danas upotrebljavaju kod mjerenja. K a p a c i t e t kondenzatora ovisi o površini prekrivanja ploča (vidi sl. 51). Ako je pokretna grupa ploča (rotor) posve izvučena iz nepokretne (stator), ne će kapacitet kondenzatora biti jednak nuli, nego nekom kapacitetu C_0 nazvanom „početni kapacitet". To dolazi otuda, što uski rubovi statora i rotora, koji se nalaze jedan prema drugome, tvore još uvijek jedan maleni kondenzator. Kapacitet C bit će općenito proporcionalan kutu zakreta rotora α: $C = k \cdot \alpha + C_r$, gdje je $k = (C_m - C_0)/180_0$, a C_m maksimalni kapacitet kondenzatora. Grafički prikaz ove jednadžbe je pravac (sl. 171).



Sl. 170.

227. — Ovakav oblik ploča nije međutim prikladan za ugađanje titrajnih krugova kod prijemnika. Iz Thomsonove jednadžbe (jednadžba (54) i jednadžba (65)] dobivamo već češće upotrebljenu jednadžbu za duljinu vala: $\lambda = 3 \cdot 10^8/f = 6 \cdot 10^8 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$. Iz toga slijedi: $\lambda = 6 \cdot 10^8 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot (k \cdot \alpha + C_0)}$ ili $\lambda = a \sqrt{k \cdot \alpha + C_t}$, ako je $6 \cdot 10^8 \cdot \pi \cdot \sqrt{L} = a$. Duljina vala proporcionalna je dakle kvadratnom korijenu kuta zakreta. Grafički prikaz te jednadžbe vidimo na sl. 170. desno. On nam pokazaje da promjena kuta zakreta $\Delta\alpha$ u donjem području izaziva mnogo veće promjene duljine vala $\Delta\lambda_1$ nego u gornjem području zakretanja. Zbog toga će valne duljine pojedinih odašiljača biti u donjem području mnogo zbijenije, nego u gornjem, pa će točno ugađanje titrajnog kruga na frekvencije iz ovog područja biti mnogo teže.



Sl. 171.

228. — Zbijenost valnih duljina dade se izbjeći upotrebom ploča b u b r e ž a s t o g o b l i k a (sl. 171 gore). Za ovaj oblik vrijedi jednadžba: $\lambda = k \cdot a + \lambda_0$ to jest duljina vala je proporcionalna kutu zakreta. U toj jednadžbi je $k = \lambda_m - \lambda_0/180^0$, ako λ_m odnosno λ_0 znače maksimalnu i minimalnu duljinu vala. Na sl. 171. desno, vidimo, da sada promjeni kuta zakreta $\Delta\alpha$ odgovara uvijek jednaka promjena duljine vala $\Delta\lambda$. Iz Thomsonove jednadžbe za λ slijedi: $k \cdot \alpha + \lambda_0 = 6 \cdot 10^8 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C}$, dakle: $C = a \cdot (k \cdot \alpha + \lambda_0)^2$, ako je $a = 1/(6 \cdot 10^8 \pi)^2 \cdot L$. Ovisnost kapaciteta C o kutu zakreta α prikazana je grafički na sl. 171. lijevo. Iz gornje jednadžbe dade se izvesti i jednadžba za krivulju ploča bubrežastog oblika; no u to se ne ćemo upuštati.

Sl. 172.

229. — Budući da odašiljači nisu raspoređeni tako da su međusobno udaljeni za jednaku duljinu vala, nego za jednaku frekvenciju (odsjek 303)., to ni kondenzatori s bubrežastim oblikom ploča ne će predstavljati zado-

voljavajuće rješenje. Kod ovakvih kondenzatora su u donjem području kuta zakreta valne duljine još uvijek dosta zbijene. To je bio razlog da se došlo do konstrukcije ploča, kod kojih je frekvencija f proporcionalna kutu zakreta (sl. 172.): $f = k \cdot \alpha + f_0$; ovdje je $k = (f_m - f_0)/180^\circ$, a f_m je frekvencija, koja odgovara kutu zakreta 0°, odnosno početnom kapacitetu C_0. Svaka promjena kuta zakreta $L\alpha$ odgovara jednakoj promjeni Lf frekvencije f (sl. 172, desno). Kod prijemnika s ovakvim kondenzatorom su odašiljači jednolično porazdijeljeni po čitavoj skali. Iz Thomsonove jednadžbe slijedi da je: $f = k \cdot \alpha + f_0 = 1/2\pi \sqrt{L \cdot C}$, dakle $C = a/(k \cdot \alpha + f_0)^2$, ako je $a = 1/4\,\pi^2 \cdot L$. C je dakle obrnuto proporcionalno kvadratu kuta zakreta α (sl. 172 lijevo). Kondenzatori s ovakvim oblikom ploča prilično su nezgodni zbog velike duljine rotorskog paketa. Osim toga daju jednoličnu podjelu frekvencija jedino onda, ako su u titrajnom krugu vezani uz induktivitet, koji je baš onoliki, koliki je bio pretpostavljen kod njihovog proračuna. To je mana, koja onemogućuje općenitu primjenu ovakvog kondenzatora.

Ponavljanje

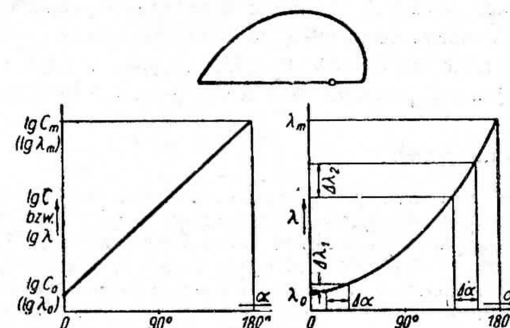
Kod promjenljivih kondenzatora je ovisnost kapaciteta, odnosno duljine vala ili frekvencije o kutu zakreta određena oblikom ploča. Polukružni oblik ploča uvjetuje linearnu promjenu kapaciteta s kutom zakreta, ali je promjena duljine vala pri tome proporcionalna kvadratnom korijenu toga kuta. Posljedica toga je zbijenost valnih duljina na donjem području kuta zakreta. Kod kondenzatora s bubrežastim oblikom ploča mijenja se kapacitet proporcialno kvadratu kuta zakreta, a duljina vala linearno s kutom zakreta. Posljedica toga je, da su duljine vala jednolično porazdijeljene po čitavom području kuta zakreta. Treći oblik rotorskih ploča uvjetuje jednoličnu podjelu frekvencija po čitavom području zakreta, a kapacitet je kod njega obrnuto proporcionalan kvadratu kuta zakreta. Njegova krivulja odgovara međutim jedino u slučaju, da se za titrajni krug upotrebi induktivitet, koji je za dotičnu krivulju bio izračunan.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kakve smo oblike ploča promjenljivih kondenzatora dosada upoznali? *Odgovor:* Polukružne, bubrežaste i takve, kojima odgovara jednolična podjela frekvencija po čitavom području. — *P.*: Kakav utjecaj ima oblik ploča? *O.*: On određuje ovisnost kapaciteta i duljine vala, odnosno frekvencije, o kutu zakreta. — *P.*: Koje su mane polukružnih ploča? *O.*: Zbijenost valnih duljina na donjem području kuta zakreta. — *P.*: Kakav oblik ploča nema ove mane? *O.*: Ploče s bubrežastim oblikom, kod kojih su valne duljine jednolično porazdijeljenje po čitavom području kuta zakreta. — *P.*: Koja je mana kondenzatora s jednoličnom podjelom frekvencija? *O.*: Dosta su veliki, a osim toga njihova krivulja vrijedi samo za jedan određeni induktivitet.

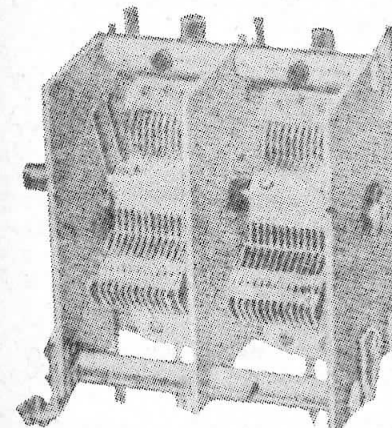
230. — U modernim prijemnicima se skoro isključivo upotrebljavaju kondenzatori s logaritmičkim oblikom ploča (sl. 173 gore i sl. 51). Kod njih je logaritam duljine vala $log\ \lambda$ proporcionalan kutu zakreta α (sl. 173. lijevo): $log\ \lambda = k \cdot \alpha + log\ \lambda_0$, gdje je $k = (log\ \lambda_m - log\ \lambda_0)/180^\circ$.

Logaritmiranjem Thomsonove jednadžbe dobivamo dalje: $log\lambda = k \cdot \alpha + log\lambda_0 = log\,(6 \cdot 10^8)\pi\sqrt{L}) + (log\ C)/2$, dakle: $log\ C = 2\,[k \cdot \alpha + log\ \lambda_0 - log\,(6 \cdot 10^8\pi\sqrt{L})]$, odnosno $log\ C = 2\,(k \cdot \alpha + a)$; ovdje je $a = log\ \lambda_0 - log\ 6 \cdot 10^8\pi\sqrt{L})$. Logaritam kapaciteta je također direktno proporcionalan kutu zakreta. Iako se i kod ovog oblika ploča odašiljači s većom duljinom vala, na gornjem području kuta zakreta, nešto zbijaju, nije to velika mana, jer su u tom području duljine valova odašiljača i onako dosta razmaknute. Velika prednost ovih kondenzatora je u tome, što njihova krivulja nije ovisna o induktivitetu, koji je kod njezinog računanja bio pretpostavljen; kod kondenzatora, o kojima smo prije govorili, to nije slučaj.



Sl. 173.

231. — U velikim prijemnicima imamo uvijek više titrajnih krugova (prijemnici s više krugova), koje treba istodobno ugađati na željenu frekvenciju. Kako bi za slušače bilo nezgodno okretati na primjer tri promjenljiva kondenzatora, građe se višestruki kondenzatori, kod kojih se pokretni dio (rotori) više kondenzatora nalazi na istoj osovini; time je stvorena i mogućnost „ugađanja jednim dugmetom". Na sl. 174. vidimo ovakav dvostruki kondenzator, kod kojeg su obje polovice međusobno električki odijeljene metalnom pločom. Ovakav kondenzator osim toga ima i metalni poklopac, koji ga posve zatvara i štiti od prašine, oštećenja i električkih smetnji.


Sl. 174.

232. — Kod višestrukog kondenzatora svaki pojedini kondenzator u svakom položaju mora imati jednaki kapacitet. Da bi se to moglo postići, imaju vanjske ploče pojedinih rotorskih paketa radijalne izreze, to jest podijeljene su u sektore. Ovi se sektori dadu prema potrebi izviti prema unutra ili prema van, čime se može postići stanovito maleno povećanje ili smanjenje kapaciteta. Osim toga svaki od ovakvih kondenzatora ima još po jedan maleni polupromjenljivi kondenzator s čvrstim dieletrikumom, nazvan „trimer". Ovakav trimer služi za izjednačenje raznih

dodatnih kapaciteta (zavojnica, preklopnik, elektronka, vod i t. d.), koji bi inače uzrokovali promjenu karakteristike kondenzatora. Na sl. 174. vidimo od oba trimera samo vijke, koji služe za njihovo ugađanje. Kad budemo govorili o prijemnicima s više titrajnih krugova, osvrnut ćemo se detaljnije na mjere kojima se postizava ujednačenje pojedinih titrajnih krugova.

Ponavljanje

Moderni promjenljivi kondenzatori imaju gotovo uvijek *logaritamske ploče*. Kod njih je logaritam kapaciteta i duljine vala proporcionalan kutu zakreta. Oblik krivulje ovakvih kondenzatora ne visan je i o induktivitetu. Da bi se postiglo olakšanje kod ugađanja prijemnika s više titrajnih krugova, grade se kondenzatori s više rotora na zajedničkoj osovini. Upotrebom malenih dodatnih polupromjenljivih kondenzatora i radijalnim sektorima vanjskih ploča rotora moguće je približno izjednačiti kapacitet svih kondenzatora u svakom položaju.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kakav oblik ploča imaju moderni kondenzatori? *Odgovor:* Njihove ploče imaju logaritamski oblik. — *P.*: Kakve su prednosti takvo oblika? *O*: Oblik krivulje neovisan je o upotrebljenom induktivitetu titrajno kruga, a osim toga dimenzije kondenzatora su malene. — *P.*: Kakva je ovisnost kapaciteta i duljine vala o kutu zakreta kod ovakvih kondenzatora) — *O.* Logaritam kapaciteta i duljine vala proporcionalan je kutu zakreta. — *P.*: Koja je svrha višestrukih kondenzatora? *O.*: Oni omogućuju ugađanje više titrajnih krugova jednim dugmetom. — *P.*: Čime se postizava jednakost kapaciteta pojedinih kondenzatora? *O.*: Što jednoličnijom izvedbom, zatim izjednačivanjem pomoću sektora na rotorskim pločama, te pomoću trimera.

Pitanja

85. Zašto je upotreba promjenljivih kondenzatora s bubrežastim oblikom ploča nezgodna kod ugađanja titrajnih krugova?

86. Da li su valne duljine kod logaritamskih kondenzatora jednoliko porazdijeljene po čitavom području kuta zakreta?

87. Kako se može izjednačiti štetno djelovanje dodatnih kapaciteta kod višestrukih kondenzatora?

Zadaci

73. Kondenzator s polukružnim pločama ima početni kapacitet 30 pF, a konačni 500 pF. Koliki mora biti induktivitet, da titrajni krug bude ugođen na 500 m, kad je kondenzator zakrenut za 60°?

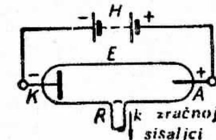
74. Titrajni krug ima induktivitet 0,24 mH i promjenljivi kondenzator s logaritamskom karakteristikom. Koja je vrijednost kapaciteta kondenzatora zakrenutog za 90°, ako je maksimalna duljina vala tog titrajnog kruga 700 m, a minimalna 160 m?

III. Fizikalni osnovi elektronskih cijevi

Električko ispražnjivanje u plinovima

233. — Jedan od najznačajnijih izuma novijeg vremena je e l e k t r o n k a, bez koje se radiodifuzija i dojavna tehnika danas ne bi mogla n zamisliti. Elektronke ne služe samo za pojačavanje, nego i za proizvođenje elektromagnetskih titraja, pa je njihovo glavno polje primjene radiotehnika, tonfilm, mjerenja, produkcija gramofonskih ploča, i t. d. Da bismo mogli shvatiti procese, koji se odigravaju u elektronkama, pozabavit ćemo se najprije pojavama, koje nastaju kod električnih ispražnjivanja u plinovima. Pomislimo pri tome najprije na običnu električku iskru, koja skoči kroz zrak između dva bliza vodiča, ako su ovi nabijeni protivnim nabojima. Zrak je kod običnog pritiska vrlo loš vodič, pa je za preskok iskre potreban vrlo visoki napon (oko 30.000 V po centimetru duljine iskre!)

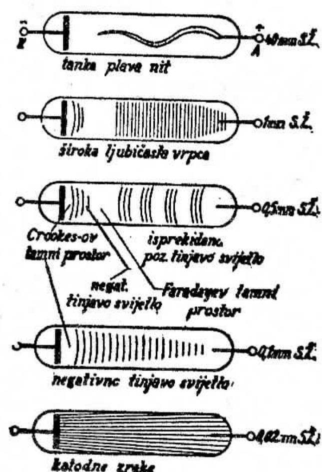
234. — Promatramo li električka ispražnjivanja u *razrеđenim plinovima*, susrest ćemo se s posve drugim pojavama, Upotrijebimo za to staklenu cijev *E* (sl. 175.), koja je cjevčicom *R* vezana sa zračnom sisaljkom! U cijevi se nalaze dvije *elektrode*: p o z i t i v n a e l e k t r o d a ili a n o d a *A* (na primjer aluminijska žica) i n e g a t i v n a e l e k t r o d a ili k a t o d a *K* (na primjer aluminijska ploča) Ove elektrode su vezane na izvor struje *H* s naponom od više hiljada volta. Kod normalnog tlaka zraka (760 mm s. ž.) ne dolazi, izuzev možda kakve iskre ni do kakvog izbijanja kroz plin. Snizimo li međutim pomoću sisaljke tlak zraka u cijevi na kojih 40 mm s. ž.) pojavit će se između polova tanka, vijugava, plavkasta, svijetla nit (sl. 176.). Ako tlak zraka snizujemo i dalje, ova nit postaje sve šira, te kod tlaka od nekih 1 mm s. ž. ispuni gotovo čitavu staklenu cijev svijetloljubičastim svijetlom (p o z i t i v n o t i n j a v o s v i j e t l o). Između katode i ovog svijetlog pojasa nalazi se maleni tamni prostor, nazvan F a r a d a y e v t a m n i p r o s t o r, dok je sama katoda prekrivena plavkastim svijetlom (n e g a t i v n o t i n j a v o s v i j e t l o, sl. 176.)



Sl. 175.

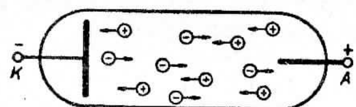
235. Razrjeđujemo li zrak i dalje, dolazi do dijeljenja svijetlog pojasa u slojeve, a kod tlaka od kojih 0,5 mm s. ž., proširuje se plavo svijetlo od katode prema anodi. Katodno svijetlo ne dodiruje međutim katodu, nego je od nje odijeljeno tamnim prostorom, koji je nazvan C r o o k e s o v i m t a m n i m p r o s t o r o m (sl. 176.). Što je razrjeđenje veće, to se

pojedini slojevi pozitivnog tinjavog svijetla više udaljuju jedan od drugoga, i to se sve više smanjuje stup pozitivnog svijetla. Na katodi nastaje onda tanki s l o j c r v e n k a s t o g s v i j e t l a, koji se naročito lijepo vidi na duljim katodama. Ako tlak zraka padne na kojih 0,1 mm s. ž., nestaje pozitivnog tinjavog svijetla, a negativno svijetlo dosiže gotovo do anode, dok se Crookesov tamni pojas proširuje. Kad tlak zraka padne konačno na nekih 0,02 mm s. ž., nestaje i negativnog tinjavog svijetla, te se ispražnjivanje više ne vidi. Kako je Hittorf (1866. god.) prvi pokazao, sada iz katode izlaze zrake, koje staklenu stijenu, naročito onu, koja leži nasuprot katodi, dovode do svjetlucanja („fluorescencija"). Ove zrake su nazvane k a t o d n i m z r a k a m a; odatle ime „katodna cijev". Ako je razrjeđenje u cijevi još veće (oko 0,001 mm s. ž.) prestaje konačno i fluorescencija, a prema tome i svaki prolaz struje kroz razrijeđeni plin.



Sl. 176.

236. — Kako se može objasniti prolaz struje kroz plinove? Plin nije nikad „neutralan", nego u njemu uvijek ima atoma s manjkom ili suviškom elektrona. U prvom slučaju govorimo o p o z i t i v n i m, a u drugom o n e g a t i v n i m i o n i m a plina. Ioni plina su prema tome pozitivno ili negativno nabijeni atomi plina. Do ionizacije dolazi radioaktivnim zračenjem zemlje, zračenjem sunca, zatim djelovanjem visinskih zraka, i t. d. Negativne ione plina privlači visoki napon anode, dok pozitivne ione privlači katoda cijevi (sl. 177.) Kako se međutim ioni giblju velikom brzinom, kod sudara s neutralnim atomima mogu oni ove razbiti u pozitivne ione i slobodne elektrone, pa dolazi do takozvane i o n i z a c i j e u s l i j e d s u d a r a. Ovako dobiveni ioni stvaraju nove pozitivne ione, a slobodni elektroni se vežu s neutralnim atomima plina stvarajući od njih negativne ione. Ova pojava se odvija progresivno. Kako se u razrjeđenom plinu nalazi mnogo manje atoma, dolazi i do mnogo manje sudara, te ioni već kod razmjerno niskih napona dobivaju brzinu, koja je potrebna za nastavak ionizacije. Dolaskom na anodu, odnosno na katodu, predaju ovi ioni svoj naboj uzrokujući time struju u krugu ispražnjivanja. Ovdje imamo isto kao i kod elektrolize izraziti prijenos struje pomoću „nosača", za razliku od čistog elektronskog prijenosa u metalnim vodičima.



Sl. 177.

237. — *Negativno tinjavo svijetlo* nastaje uslijed ionizacije u neposrednoj blizini katode. Razmjerno teški pozitivni ioni izbijaju kod sudara s katodom elektrone, koji se ubrzano giblju prema anodi. Ionizacijom, koju oni uzrokuju u prolazu kroz Faradayev tamni prostor, nastaje *pozitivno tinjavo svjetlo*. Podijeljenost ovoga svijetla u slojeve tumači se na taj način, da su elektroni uslijed sudara izgubili brzinu, koju postizavaju ponovo tek nakon kratkog prolaza kroz tamni sloj, u kojem bivaju ubrzani djelovanjem polja. U ovom tamnom prostoru je naime jakost električnog polja malena, tako da ne može doći do ionizacije sudarom. Negativno *tinjavo* svijetlo se praktički iskorištava u *tinjalicama*, a pozitivno tinjavo svijetlo u *reklamnim staklenim cijevima*. Kod još većeg razrjeđenja plina elektroni, koji izlaze iz katode, ne uzrokuju više znatniju ionizaciju, već se kroz cijev giblju u pravcu izazivajući kod sudara sa staklom fluorescenciju. Kod vrlo razrjeđenih plinova ne može zbog manjka iona uopće doći do struje.

Ponavljanje

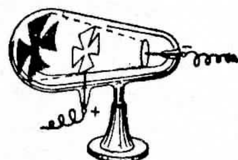
U *razrjeđenim plinovima* dolazi kod visokih napona do električkog ispražnjivanja, koje je, već prema stupnju razrjeđenja plina, vezano na različite pojave svijetla. Struju ispražnjivanja uzrokuju pozitivni i negativni ioni plina, koji se uslijed *ionizacije sudarom* stalno množe. *Negativno tinjavo svijetlo* nastaje ionizirajućim djelovanjem pozitivnih iona u blizini katode. *Pozitivno tinjavo svijetlo* nastaje djelovanjem elektrona, koji s katode idu prema pozitivnoj anodi. Kad je tlak u cijevi manji od 0,02 mm s. ž., ioni plina izbijaju iz katode elektrone, koji kao katodne zrake idu u pravcu anode i kod sudara sa staklom izazivaju fluorescenciju. Kad tlak konačno padne ispod 0,001 mm s. ž., zbog pomanjkanja iona, struja prestaje teći.

Pitanja i odgovori

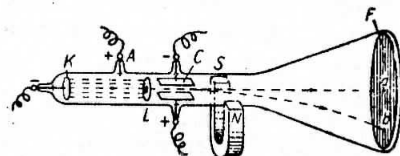
Pitanje: Kako dolazi do prolaza struje kroz plinove? *Odgovor*: Uslijed visokog napona između anode i katode dolazi do ubrzanja pozitivnih i negativnih iona plina, koji opet ioniziraju neutralne atome plina. — *P.*: Kako se naziva ovakav način ionizacije? *O.*: Ionizacija sudarom. — *P.*: Kakve su popratne pojave ionizacije plina? *O.*: U plinu nastaju pojave svijetla (pozitivno i negativno tinjavo svijetlo), i tamni prostor (Faraday-ev i Crookes-ov), koji svijetle slojeve prekida. — *P.*: Kako nastaju katodne zrake? *O.*: Sudarom pozitivnih iona s katodom izbijaju se iz katode kod stanovitog tlaka elektroni. — *P.*: Kako se utvrđuje postojanje katodnih zraka? *O.*: Fluorescencijom na stijenama staklene cijevi, koja nastaje, kad ove zrake udare o stijene.

238. — Kako smo vidjeli u odsjeku 235. *katodne zrake* u razrjeđenim plinovima nastaju uslijed sudara pozitivnih iona s katodom. Ove zrake, nazvane još i *elektronskim zrakama*, sastoje se od negativnih elektrona, koji se iz katode kreću u pravcu brzinom od 1/100 do 1/3 brzine svijetla (300 000 km/s) već prema jakosti električkog polja. (Brzina elektrona je: $v = 594 \sqrt{U}$ [km/s], ako je U jakost polja u [V]). Ako katodne zrake naiđu na putu na kakvu zapreku, na primjer na križ od aluminija, na dijelu stakla, koji se nalazi iza te zapreke nastaje oštra sjena, u ovom slučaju sjena križa (sl. 178). Ovaj pokus dokazuje, da se katodne zrake š i r e u p r a v c u. Postavimo li katodnim zrakama na put „svijetleći zaslon" premazan metalnim sulfidima,

i on će svijetliti fluorescentno. Na isti način katodne zrake uzrokuju fluorescenciju raznih minerala, od kojih neki svijetle i nakon prestanka djelovanja katodnih zraka („fosforescencija").



Sl. 178.

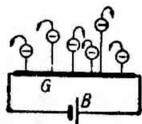


Sl. 179.

239. — Od naročite je važnosti činjenica, da se katodne zrake djelovanjem magnetskog i električkog polja otklanjaju (Hittorf 1869). Ova pojava je daljnji dokaz za elektronsku prirodu katodnih zraka, a može se lako pokazati: Na sl. 179. vidimo takozvanu Braunovu cijev (Braun, 1897.) u najjednostavnijem obliku. U dugačkom staklenom cilindru osim anode A i katode K nalazi se i zaslon s rupom L, kroz koji prolaze elektroni jednoličnom brzinom u pravcu nadesno stvarajući tako tanku zraku. Ova kod sudara s fluorescentnim zastorom F izaziva na njemu svijetlu točku a. Iza zaslona se nalazi maleni kondenzator C. Budući da su elektroni nabijeni negativno, elektronska zraka, kad dođe u polje nabijenog kondenzatora C, bit će električki otklonjena u označenom smjeru, a svijetla će se točka na zastoru F pomaknuti iz položaja a u položaj b. Pomoću potkovastog magneta $N—S$ može se katodna zraka otkloniti magnetski. Katodna zraka se sastoji od elektrona, koji se brzo gibiju, pa ustvari predstavljaju električku struju, koja, kao svaka struja, ima magnetsko djelovanje. Braunova cijev, o kojoj ćemo kasnije još opširnije govoriti, igra vrlo važnu ulogu kod *televizije* i kod gradnje *oscilografa* za mjerenja.

240. — Iz pokusa s otklanjanjem dadu se donijeti vrlo važni zaključci o naravi elektrona. Račun pokazuje da je masa elektrona vrlo malena i da iznosi samo 1/1850 od mase najlakšeg, vodikovog atoma, što znači da je masa elektrona oko $8,7 \times 10^{-28}$ g! Promjer elektrona iznosi oko 4×10^{-12} mm, dok je promjer jednog atoma oko 2×10^{-7}. Ako atom prikažemo kuglom promjera 10 m, elektron bi imao promjer tek 0,2 mm. Dalje se može izračunati, da je naboj elektrona $1,6 \times 10^{-19}$ C (kulona).

241. — Katodne ili elektronske zrake mogu se proizvoditi i na drug način, a ne samo pomoću pozitivnih iona plina u razrijeđenim plinovima. Njih možemo dobiti i u *zrakopraznom prostoru*. Budući da u njemu nema iona plina, moramo se poslužiti drugim sredstvom. Već je *Hittorfu* bilo poznato da užarena metalna žica može isijavati elektrone; u tom slučaju govorimo o užarenoj katodi. U užarenoj metalnoj žici atomi se živahno gibiju, a s njima se gibiju i „slobodni elektroni", koji se nalaze između pojedinih atoma. Iznad neke stanovite temperature je brzina elektrona tako velika



Sl. 180.

da oni užarenu žicu napuštaju (sl. 180.), slično kao što molekule pare napuštaju kipuću vodu. Isijani elektroni predstavljaju za žicu manjak elektrona, uslijed čega ona postaje pozitivna, i nastoji privući elektrone. S druge strane oko užarene metalne žice stvara se „oblak elektrona", koji na elektrone, koji dolaze, djeluje odbojno i smanjuje im brzinu, tako da oni djelomično padaju natrag na užarenu nit. Žarenje metalne žice obično se vrši pomoću električke struje, na primjer iz baterije B na sl. 180.

242. — Prema *Wehneltovom* otkriću (1904.) može se emisija elektrona postići već kod znatno nižih temperatura, ako se umjesto čistih metalnih niti upotrijebe niti s *prevlakom oksida* kalcija, barija, stroncija i sl. Time se znatno smanjuje radnja, koju elektroni troše, kad napuštaju katodu. Dok na primjer katodu od volframa moramo zagrijati na 2.000° C (bijeli žar), potrebno je katode prevučene oksidni slojemm zagrijati na samih 600° C (crveni žar) da bi se dobila ista količina elektrona. Na taj način se znatno smanjuje učin potreban za žarenje niti, što je kod upotrebe ovakvih niti u elektronkama vrlo važno.

Ponavljanje

Katodne ili elektronske zrake sastoje se od elektrona, koji se gibiju u pravcu i mogu se *otklanjati* magnetskim ili električkim poljem, Na zaslonu *Braunove* cijevi ovaj otklon može se vidjeti i mjeriti. Katodne se zrake mogu proizvoditi i u zrakopraznom prostoru upotrebom *užarenih katoda*, dakle užarenih metalnih niti ili ploča. Ovakva užarena katoda emitira, već prema temperaturi, stanoviti broj elektrona u jedinici vremena. Naročito obilno emitiraju katode, koje se sastoje od metalne niti prevučene *slojem nekih oksida*. One već kod crvenog žara odaju velike količine elektrona.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Koja svojstva imaju elektronske zrake? *Odgovor:* One se sastoje od elektrona, šire se u pravcu i mogu se otklanjati električkim i magnetskim poljem. — *P.*: Što je Braunova cijev? *O.*: Cijev, koja se sastoji od anode, katode, zaslona, fluorescentnog zastora i uređaja za otklanjanje (kondenzator, trajni magnet ili zavojnica). — *P.*: Na koji način se mogu elektroni proizvoditi i u zrakopraznom prostoru? *O.*: Užarenim metalnim žicama ili pločama, dakle užarenim katodama. — *P.*: Kakve su užarene katode najdjelotvornije? *O.*: Katode s oksidnom prevlakom. — *P.*: Koje su prednosti ovakvih katoda? *O.*: One troše mnogo manji učin za žarenje, jer ih je dovoljno zagrijati do crvenog žara.

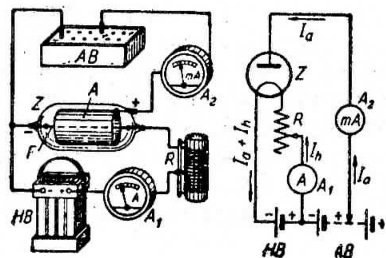
Pitanja

88. Kako nastaje pozitivno, odnosno negativno tinjavo svijetlo?
89. Kako se objašnjava emisija elektrona iz užarene niti?
90. Mogu li se u cijevi s užarenom katodom opaziti iste pojave kao u cijevi s „hladnom" katodom?

Zadaci

75. Koji pad napona mora elektron proći u Braunovoj cijevi, da dobije brzinu, koja je jednaka 1/5 brzine svijetla?
76. Koliki bi morao biti atom, ako elektron zamislimo kao kuglu promjera 256 m?

243. — Prednost užarenih katoda pred „hladnima“ je u tome, što je pokuse, o kojima smo ranije govorili, moguće izvesti s mnogo nižim anodnim naponima. Zanimat će nas naročito proces ispražnjivanja u vrlo razrijeđenim plinovima (ispod 10^{-3} mm s. ž.), dakle proces u „visokom vakuumu“. Kod cijevi s hladnom katodom uz ovakav vakuum uopće ne dolazi do izbijanja. Prilike su međutim drugačije, ako imamo *užarenu katodu H* (sl. 181., lijevo) okruženu metalnom cilindričnom *anodom A*, a razrjeđenje je još mnogo veće. Ovakvu cijev nazivamo d i o d o m (prema grčkom), jer ima dvije elektrode. Žarna nit *F* ukopčana je u krug baterije *HB*, koja služi za žarenje niti. U taj krug je ukopčan ampermetar A_1 i otpornik *R*, kojim se može regulirati jakost struje žarenja. Na anodu je doveden pozitivni napon iz anodne baterije *AB*. U anodnom krugu nalazi se i miliampermetar A_2. Krug se zatvara na taj način, što se negativni pol anodne baterije priključuje na pozitivni pol baterije *HB*, odnosno na katodu. Sve ovo vidimo na sl. 181., u kojoj je na desno ovaj spoj prikazan shematski normiranim simbolima.

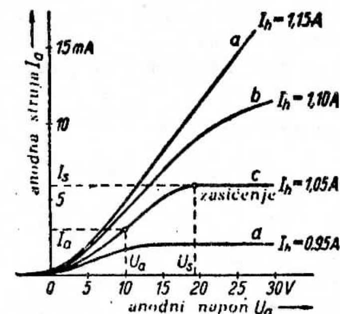


Sl. 181.

244. — Ako anodni napon U_a (mjeren prema negativnom polu baterije za žarenje) ima vrijednost nula, ako je dakle utikač, koji ide na anodu, spojen s utikačem anodne baterije, koji ide na katodu, tada će i uz najjače zagrijavanje žarne niti kroz miliampermetar A_2 teći tek neznatna struja Tome je razlog činjenica da zbog međusobnog odbijanja tek maleni dio elektrona, koji izađu iz katode, dolazi do anode. Ako međutim zadržimo struju žarenja na nekoj stalnoj vrijednosti I_h, pa anodi dajemo redom 5, 10, 15 .... V, miliampermetar A_2 pokazivat će svaki put sve veću struju. Elektroni će sada pod djelovanjem polja biti tjerani k anodi, a time će se pomalo razrjeđivati i „elektronski oblak“, koji okružuje katodu. Elektroni tada teku preko A_2 i *AB* k negativnom polu katode *F*, te govorimo o e l e k t r o n s k o j s t r u j i, s t r u j i e m i s i j e i l i a n o d n o j s t r u j i I_a. Smjer toka struje na sl. 181, desno odgovara uobičajenom načinu označivanja smjera struje. Ova pojava se može usporediti isparivanjem tekućine: Isparene čestice tekućine (elektroni) udaraju o hladnu ploču (anodu), s koje se mogu pomoću sisaljke (anodne baterije) opet dovesti toploj tekućini, iz koje su se isparili (katoda). Što je veća jakost struje I_h i anodni napon U_a, to će veća biti i anodna struja I_a.

245. — Prikažimo sada ovisnost jakosti struje I_a o anodnom naponu U_a grafički. Dobivamo krivulju kao na sl. 182., koja se naziva k a r a k t e r i s t i k a diode. Četiri krivulje *a, b, c, d* odnose se na četiri različite jakosti struje žarenja I_h; pri tome krivulja *a* odgovara najvećoj vrijednosti

struje I_h. Upada u oči činjenica, da krivulje ne počinju u nul-točki, nego da i kod malenog n e g a t i v n o g anodnog napona imamo već neku malenu anodnu struju. Ova takozvana p o č e t n a s t r u j a može se protumačiti činjenicom, da uvijek ima elektrona, koji iz katode izlaze tolikom brzinom, da se mogu gibati i protiv malenog negativnog napona. Također je zanimljivo, da anodna struja teži k nekoj m a k s i m a l n o j vrijednosti, na primjer uz anodni napon U_s vrijednosti I_s za krivulju *c*. Daljnje povećavanje anodnog napona nema obzirom na struju nikakvog smisla. Ova važna pojava naziva se z a s i ć e n j e m, pa govorimo o struji zasićenja I_s. Stanje zasićenja postizava se onda, kad svi elektroni, koji izađu iz katode, budu privučeni od anode. Povećanje struje zasićenja može se izvršiti samo tako, da se poveća jakost struje grijanja (na primjer kod krivulje *b* i *a*) Što je viša temperatura katode, to veći mora biti anodni napon, da se dođe u stanje zasićenja (vidi krivulju *a*). Prema *Richardson-Schottky-Dushmanu* za *struju zasićenja* I_s (u amperima po cm² površine katode) vrijedi jednadžba:



Sl. 182.

$$I_s = 60{,}2\ T^2 \cdot e^{-\frac{b}{T}} \left[\frac{A}{cm^2}\right] \quad \ldots\ldots (85)$$

Ovdje je *T apsolutna* temperatura, dakle temperatura u stupnjevima Celsiusa povećana za 273° ($T = {}^0C + 273$), $e = 2{,}718$, baza *prirodnih* logaritama, a *b* konstanta ovisna o materijalu žarne niti. *Za volfram* je $b = 52340$, za čisti *torij* $b = 38380$, za *volframovu nit s torijevom prevlakom* $b = 30240$ za *kalcij* i *stroncij* $b = 20940$, a za *barij* $b = 17.450$. Iz vrijednosti za *b* vidi se prednost barijevih, stroncijevih i kalcijevih katoda. Što je naime *b* manji, to je prema jednadžbi (85) veća struja zasićenja I_s kod iste temperature Žarne niti se međutim ne smiju prejako usijavati, jer se u tom slučaju dešava, de se volfram, odnosno slojevi, kojima je nit prevučena, brzo ispare. Previsoka temperatura žarenja nije uostalom ni potrebna, jer elementi nabrojeni pri koncu daju već i kod niskih temperatura dovoljno visoke struje zasićenja. Te struje rijetko se u pogonu praktički iskorištavaju.

246. — Moderne elektronke, koje se upotrebljavaju za prijemnike i pojačala, imadu b a r i j e v u k a t o d u. Ona se sastoji od tanke žarne niti od volframa, na koju je posebnim postupkom nanesen tanki sloj barijevog oksida, koji se „izžaruje“ tri do četiri puta jačom strujom od pogonske. Tek ovim izžarivanjem se površina žarne niti osposobljava za emisiju elektrona. Pri tome barijev oksid tvori na površini vrlo tanak sloj čistog barija. Ovaj se sloj za vrijeme pogona isparuje i nadomješta novim

slojem, koji nadolazi iz dubljih slojeva barijevog oksida. To ide dotle, dok cijev konačno ne postane neuporabiva („gluha"). Pogonska temperatura elektronki s barijevom katodom iznosi oko 700° C. U odsjeku 255. govorit ćemo detaljnije o praktičkoj izvedbi modernih katoda.

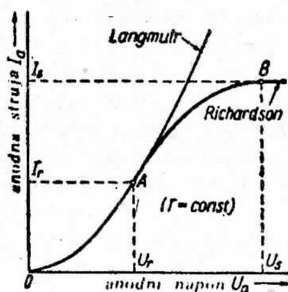
Ponavljanje

Dioda se sastoji od staklenog balona s visokim vakuumom i dvije elektrode: anode i katode. Pozitivni anodni napon siše elektrone iz okoline žarne niti, pa se na taj način stvara *anodna struja* ili *struja emisije*. Kod stanovitog anodnog napona anodna *struja* postizava vrijednost *zasićenja*, koju možemo dobiti iz *Richardson-Schottky-Dushmanove* jednadžbe. Struja zasićenja se može povećati samo istodobnim povećanjem anodnog napona i jakosti struje žarenja. Anodna struja se pojavljuje već kod malenog negativnog napona na anodi i naziva se tada *početnom strujom*. Kod modernih elektronki upotrebljava se najčešće *barijeva katoda*, dakle volframova nit s tankim slojem čistog barija na površini, a pogonska temperatura ovakvih niti kreće se oko 700° C.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Što je dioda? *Odgovor:* Elektronka s dvije elektrode: s anodom i katodom. — *P.*: Koje strujne krugove razlikujemo kod diode? *O.*: Strujni krug žarenja i anodni strujni krug. — *P.*: Kako u diodi dolazi do anodne struje? *O.*: Elektrone, koji izlaze iz žarne niti, privlači anoda, odakle oni preko anodne baterije dolaze opet na katodu. — *P.*: Da li anodna struja može postići po volji visoku vrijednost? *O.*: Ne, uz stalnu jakost struje žarenja postizava anodna struja kod stanovitog anodnog napona neku maksimalnu vrijednost. — *P.*: Kako se naziva ova maksimalna vrijednost? *O.*: Struja zasićenja. — *P.*: Čime se dade povećati struja zasićenja? *O.*: Istodobnim povećanjem temperature žarne niti i anodnog napona. — *P.*: Što nam pokazuje karakteristika diode? *O.*: Ovisnost anodne struje o anodnom naponu kod dane jakosti struje žarenja.

247. — Kad smo govorili o karakteristici diode, mimoišli smo jedno važno pitanje: čime se objašnjava zakrivljenost karakteristike (sl. 182.), odnosno zašto se iz početne struje ne prelazi odmah u struju zasićenja? Iz odsjeka 241. znamo, da oko katode postoji oblak elektrona, koji nazivamo p r o s t o r n i m n a b o j e m. Taj naboj je ovisan o brzini elektrona. Što se naime elektroni gibiju brže, to brže će se udaljiti od katode, pa će to manji biti i prostorni naboj. U blizini katode je gustoća elektrona najveća, pa je prema tome i prostorni naboj najveći. Povišeni anodni napon siše u istom vremenu veći broj elektrona, pa se prostorni naboj smanjuje, a anodna struja raste. Vrijednost struje zasićenja postizava se prema Richardsonovoj jednadžbi tek onda, kad anodni napon uz stalnu struju žarenja postigne stanovitu vrijednost.



Sl. 183.

248. — Na sl. 183. vidimo još jednu karakteristiku diode dobivenu za neku temperaturu žarenja T $(T = const.)$. U točki B struja postizava vrijednost zasićenja $I_a = I_s$, jer je anodni napon $U_a = U_s$ za to dovoljno velik. U točki A je anodna struja $I_a = I_v$ znatno slabija od struje I_s. To se objašnjava djelovanjem prostornog naboja zbog preniskog anodnog napona $U_a = U_r$. Kako su pokazali *Langmuir* (čitaj Lengmir) i *Schottky*, ovisnost *struje* u području *prostornog naboja* o anodnom naponu U_a (za $U_a < U_s$), može se prikazati slijedećom j e d n a d ž b o m p r o s t o r n o g n a b o j a: (sl. 183.):

$$I_r = k \cdot U_a^{\frac{3}{2}} = k \cdot U_a \cdot \sqrt{U_a} \text{ [A]} \quad . . . . (86)$$

Ovdje je k konstanta ovisna o geometrijskim dimenzijama diode. Za jednostavne geometrijske tvorevine može se k izračunati, pa je tako za c i l i n d r i č n i o b l i k, kao na sl. 181., $k = 14{,}6 \cdot 10\text{-}6 \cdot (l/r)$, ako je l duljina žarne niti, a r radius cilindra anode. Naročito je napadno, da je struja prostornog naboja I_r ovisna samo o geometrijskom obliku i anodnom naponu U_a, a posve neovisna o temperaturi žarne niti. Jače žarenje katode ima za posljedicu samo to, da će struja prostornog naboja tek kod viših anodnih napona preći u struju zasićenja. To je uostalom lako razumjeti, ako se pomisli da viša temperatura niti povećava gustoću elektrona u njezinoj blizini, a prema tome i prostorni naboj. Kako se odnos l/r ne može učiniti po volji velikim, za anodne napone od nekoliko volta dobivamo iz jednadžbe (82) anodne struje od samo nekoliko miliampera.

249. — Dioda se praktički upotrebljava za *ispravljanje izmjeničnih struja*. Naša ranija razmatranja su nam već naime pokazala, da se elektroni u diodi gibiju uvijek samo u jednom smjeru i to s tople elektrode (katode) prema hladnoj (anodi). Vidimo dakle da je dioda — isto kao i kristalni detektor — „električki ventil", koji propušta struju samo u jednom smjeru. Dioda radi međutim mnogo savršenije od kristala, jer je njezin otpor u jednom smjeru ne samo vrlo velik, nego b e s k o n a č a n. Ispravljačko djelovanje diode odgovara posve onome, što je prikazano sl. 133. i sl. 134. U drugom dijelu ove knjige pozabavit ćemo se opširnije upotrebom diode kao ispravljača niskofrekventnih i visokofrekventnih izmjeničnih struja.

Ponavljanje

Oblak elektrona, koji okružuje užarenu katodu, tvori *prostorni naboj*, koji zbog odbojnih sila predstavlja zapreku gibanju elektrona. Radi toga anodna struja postizava tek kod nekog minimalnog anodnog napona vrijednost struje iznad toga područja naziva se *strujom prostornog naboja*. Prema *Langmuirovoj jednadžbi prostornog naboja* anodna struja je u ovom području proporcionalna 1,5-oj potenciji anodnog napona, a osim toga je ovisna samo o dimenzijama anode i katode, a ne i o temperaturi. Dioda se u praksi upotrebljava za *ispravljanje* visokofrekventnih i niskofrekventnih izmjeničnih struja, jer u smjeru anoda-katoda predstavlja beskonačno veliki otpor.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Što razumijevamo pod prostornim nabojem? *Odgovor*: Zbog oblaka elektrona, koji se nalazi oko žarne niti, nabijena je okolina katode negativno. — *P.*: Kakav utjecaj ima prostorni naboj na anodnu struju? *O.*: Anodna struja ne naraste odmah, nego tek postepeno do vrijednosti za

sićenja. — *P.:* Kakva je ovisnost struje prostornog naboja o anodnom naponu? *O.:* Prema Langmuirovoj jednadžbi ta je struja proporcionalna 1,5-oj potenciji anodnog napona. — *P.:* O čemu je struja prostornog naboja još ovisna? *O.:* O dimenzijama anode i katode. — *P.:* Zašto se dioba praktički upotrebljava? *O.:* Za savršeno ispravljanje visokofrekventnih i niskofrekventnih izmjeničnih struja. — *P.:* Zašto je baš dioda za to prikladna? *O.:* Jer propušta struju samo u smjeru od katode prema anodi, dok je u protivnom smjeru beskonačno veliki otpor.

Pitanja

91. Iz kojih se triju struja sastoji anodna struja kod diode?

92. Kako se struja prostornog naboja i struja zasićenja mogu približno izračunati?

93. Kako se objašnjava neovisnost struje prostornog naboja o temperaturi katode?

Zadaci

77. Koju struju zasićenja daje barijeva katoda zagrijana na 627°C?

78. Koliko je puta veća struja zasićenja barijeve katode od volframove katode, ako obje imaju temperaturu 727° C?

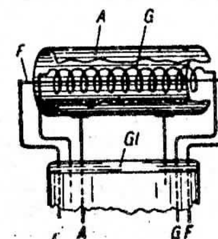
79. Imamo diodu, kojoj je žarna nit dugačka 14 mm, a polumjer cilindrične anode je 4 mm. Kolika je struja prostornog naboja kod anodnog napona 100 V?

Trioda

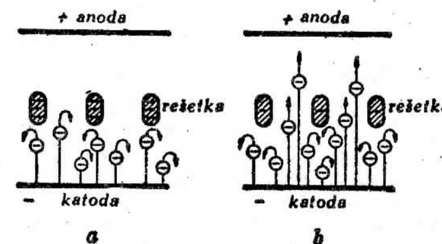
250. — Kod razgovora o diodi upoznali smo bit elektronske struje i utjecaj negativnog prostornog naboja. Prema onome, što smo vidjeli, možemo zaključiti, da se na elektrone, koji se giblju gotovo bez tromosti, može u t j e c a t i nabojima dovedenim u elektronku. Drugim riječima, to znači, da postoji mogućnost mijenjanja jakosti elektronske struje utjecajem izvana. Kako se na elektrone može djelovati i najslabijim poljima, ne će za mijenjanje jakosti struje biti potrebno utrošiti nikakvu radnju. Svaki n e g a t i v n i naboj, koji dovedemo u elektronku, nastojat će oslabiti struju elektrona, a svaki p o z i t i v n i naboj ubrzavat će elektrone, dakle pojačavati struju. Na struju se međutim može utjecati i vanjskim m a g n e t s k i m poljima o čemu smo već govorili kod Braunove cijevi. Ideja o magnetskom djelovanju na elektronsku struju potječe od L i e b e n a (1906. god.), dok je na posve električko djelovanje prvi došao d e F o r e s t (1906. god.). On je u prostor i z m e đ u anode i katode postavio *treću* pločastu *elektrodu.* Godine 1907. *de Forest* je svoja otkrića usavršio tako, da je umjesto pločaste elektrode upotrijebio *rešetku.* Tako je nastala prethodnica moderne elektronke.

251. — Budući da se nabojem na rešetki može djelovati na anodnu struju, pomoću nje se mogu dakle uzbuditi promjene jakosti struje, koja teče prema anodi, rešetka se naziva još i u z b u d n o m r e š e t k o m (za razliku od ostalih rešetki, koje u elektronkama, o kojima ćemo kasnije govoriti, imadu drugu zadaću Ova se rešetka naziva i signalnom, jer na nju dolazi signal). Umetanje rešetke pretvorilo je diodu u t r i o d u. Na sl. 184 vidimo presjek jedne triode. *A* je cilindrična *anoda, G* spiralna *rešetka,* a *F žarna nit* postavljena koaksijalno s anodom i rešetkom. Sve tri elektrode pričvršćene su na stakleno nožište G_1 i smještene u balon s razređenim

zrakom. Djelovanje rešetke može se objasniti sl. 185.: Pretpostavimo najprije da je rešetka bila kakvim načinom nabijena negativno. Posljedica toga će biti, da će elektroni, koji dolaze iz katode, biti od nje odbijani, te će padati natrag na katodu. Uprkos pozitivnog anodnog napona neće elektroni doći ni



Sl. 184.

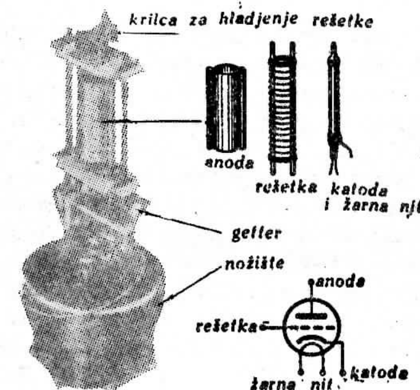


Sl. 185.

do anode ni do rešetke (sl. 185.-a). Ako je na rešetki negativni naboj manji, bit će elektroni još uvijek odbijani, ali ne u tolikoj mjeri, pa će neki od njih zbog svoje brzine proći kroz rešetku i doći do anode, uzrokovavši time slabu anodnu struju (sl. 185-b). Što je niži negativni napon rešetke (prema katodi), i što je viši anodni napon, to više će elektrona dolaziti na anodu.

252. — Vidimo dakle, da se na anodnu struju može utjecati bez ikakvih poteškoća mijenjajući naboj na rešetci. Ovdje se dakle radi o *uzbudnom djelovanju negativnog prostornog naboja.* Čitav ovaj proces djelovanja na anodnu struju dade se uporediti s djelovanjem prigušnog ventila u cijevi za dovod pare kod parnog stroja. I kod toga je naime potrebna samo neznatna radnja, da bi se pomoću ventila moglo izvršiti upravljanje velikim energijama. Zbog toga se trioda može smatrati također r e l e o m *(relais),* koji radi bez tromosti i bez potroška energije.

253. — Sada ćemo se pozabaviti t e h n i č k o m gradnjom triode! osnovna razjašnjenja iz ovog poglavlja poslužit će nam i kasnije, kad budemo govorili o elektronkama s više elektroda. Na sl. 186. vidimo unutarnju građu jedne moderne triode. Sve tri elektrode su nacrtane osim toga posebno, a na istoj slici vidimo i simbol za triodu. Pojedine elektrode su pričvršćene na nosače i učvršćene tinjcem ili staklom, da ne može doći do promjene njihovog položaja. Elektrode su ugrađene u dobro evakuirani stakleni balon.



Sl. 186.

Na svojoj donjoj strani balon je ugrađen u „nožište", koje ima izvode od pojedinih elektroda. Nožište se može utaknuti u odgovarajuće podnožje.

Najvažnija elektroda u elektronki je katoda. Razlikujemo direktno i indirektno žarene katode. Kod direktno žarenih katoda, o kojima smo do sada govorili, aktivni sloj je nanesen direktno na žarnu nit. Ovakve se katode upotrebljavaju u prvom redu kod elektronki, koje struju žarenja uzimaju iz baterija. Napon žarenja je obično 2 ili 4 V, a učin koji se troši za žarenje, 0,1 do 4 W.

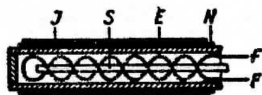
Ponavljanje

Ugradimo li u diodu između anode i katode treću *rešetkastu* elektrodu, dobivamo *triodu*. Ova treća elektroda djeluje na anodnu struju, već prema svom naboju, jače ili slabije. Ako je dovoljno negativno nabijena, ne će kroz triodu ni kod većih anodnih napona teći nikakva struja. Trioda je stvarno rele, koji radi bez tromosti i bez potroška energije. Katode trioda mogu biti žarene direktno i indirektno. Kod *direktno žarenih katoda* aktivni sloj se nalazi neposredno na žarnoj niti.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Što razumijevamo pod uzbuđivanjem promjena jakosti elektronske struje? *Odgovor:* Djelovanje na jakost elektronske struje električkim ili magnetskim poljima. — *P :* Što je trioda? *O.:* Visokoevakuirani stakleni balon s tri elektrode: anodom katodom i rešetkom. — *P.*: Čemu služi rešetka? *O.:* Ona svojim nabojem djeluje na anodnu struju — *P.*: Na koji način se djeluje na anodnu struju? *O :* Davanjem različitih naboja rešetki. — *P.*: Kakva je ovisnost anodne struje o veličini naboja na rešetki? *O.*: Što je manji negativni naboj režetke, to je veća anodna struja Veliki negativni naboj na rešetki posve sprečava tok anodne struje. — *P :* U čemu je naročita prednost triode? *O.*: Što se djelovanje na anodnu struju vrši praktički bez potroška energije. To je moguće zbog toga što elektroni praktički nemaju tromosti. — *P :* Čime smo usporedili proces djelovanja naboja rešetke na anodnu struju? *O.*: Djelovanjem prigušnog ventila kod parnog stroja. — *P.:* Što je direktno žarena katoda? *O.:* Žarna nit, na koju je direktno nanesen aktivni sloj.

254. — Ako struju za žarenje uzimamo iz *rasvjetne mreže* (prijemnici za priključak na mrežu), uzrokovat će direktno žarena katoda zbog promjena u naponu, naročito kod izmjenične struje, nepodnosivo brujanje za vrijeme prijema Ove smetnje dol ze od trajnih promjena temperature žarne niti, jer to uzrokuje trajne promjene anodne struje Drugi je razlog u tome, što ni rešetka u ovakvom slučaju ne može imati stalan napon prema žarnoj niti, jer se napon žarne niti neprestano mijenja, pa od toga dolazi do nepoželjnog mijenjanja jakosti anodne struje u taktu promjena napona rasvjetne mreže I konačno kao treći razlog može se navesti izmjenično magnetsko polje oko žarne niti, koje također djeluje na jakost anodne struje. Sva tri ova razloga smetnji dadu se izbjeći upotrebom indirektno žarenih katoda. Kod ovakvih katoda nalazi se aktivni sloj *E* (sl. 187.) na cjevčici od nikla *N* a ne direktno na žarnoj niti *F*. Cjevčica *N* odijeljena je od žarne niti cjevčicom *J* od keramike. Aktivna površina katode žari se dakle prijenosom topline indirektno, tako da je proces žarenja posve odijeljen od procesa emisije



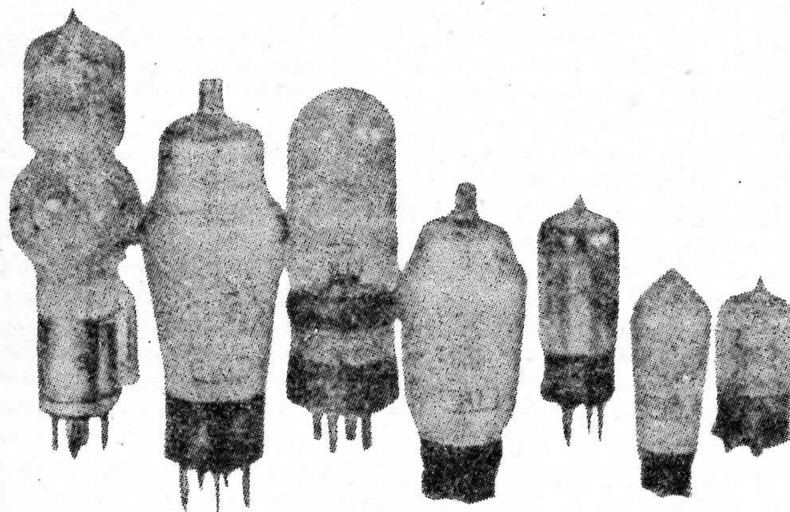
Sl. 187.

Zbog toplinske tromosti cjevčice *J* ne mogu se sada varijacije napona

žarenja prenositi na katodu, te katoda po čitavoj površini zadržava stalnu temperaturu i stalan napon prema rešetki („ekvipotencijalna katoda"). Vanjski oblik indirektno žarene katode vidimo na sl. 186. desno.

255. — Brujanje, koje dolazi od magnetskog polja žarne niti, otklanja se bifilarnim namatanjem žarne niti. Kod starijih bifilarnih katoda žarna nit je imala oblik ukosnice, koja je bila provučena kroz izoliranu cjevčicu, pa su se magnetska izmjenična polja obiju polovina nit međusobno poništavala (vidi odsjek 241). Kod modernih bifilarnih katoda žarna nit je upredena oko keramičkog štapića *S*, da bi se postigla mehanička čvrstoća Ovako upredena nit učvršćuje se keramičkom masom u nedjeljivu cjelinu s cjevčicom *J*. Zbog toplinske tromosti upotrebljenog izolatora, potrebno je 30 do 50 s, dok se katoda dovede na pogonsku temperaturu. Ako se međutim cjevčica J izostavi, pa se žarna nit odijeli od cjevčice *N* samo keramičkom masom, može se vrijeme, koje je potrebno da se postigne pogonska temperatura, sniziti na nekih 25 s. Prijemnici, koji imaju elektronke s ovakvim katodama, koje se brzo žare, spremni su prema tome za pogon već nakon 25 s. Istodobno se ovim postupkom snizuje i učin, koji se troši na žarenje ovakvih katoda: uz napon žarenja 4 V sa 4,4 W na 2,5 W.

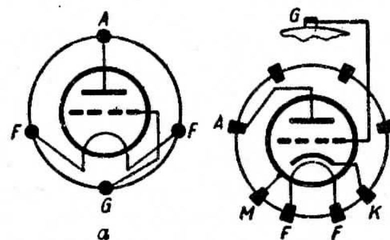
256. — Uz manji učin žarenja potrebno je manju toplinu odvoditi van pa se dimenzije balona ovakvih elektronki mogu također znatno smanjiti.



Sl. 188.

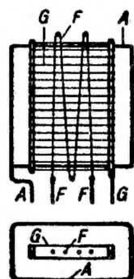
Smanjenju dimenzija pridonosi osim toga i činjenica, da ovakve elektronke nemaju nožište s nožicama, nego sa stopicama, kako se to

vidi na sl. 186. i sl. 188. Uklanjanjem nožica s nožišta dobivaju elektronke i stanovite električke prednosti, kao što je smanjenje kapaciteta i smanjenje mogućnosti odvoda. Na sl. 189.-a vidimo shematski prikaz elektronke, koja ima nožište s nožicama, i druge, koja ima nožište sa stopicama. Primjećujemo dalje, da je izvod za rešetku G na gornjoj strani balona, a to je slučaj kod gotovo svih modernih elektronki. Time se umanjuje štetni kapacitet između dovoda k rešetki i dovoda k ostalim elektrodama. Na sl. 188. vidimo jedan lijep historijski pregled razvoja elektronki od god. 1906. do 1935. Prva po redu je Liebenova elektronka iz god. 1906., a treća Telefunkenova s pločastom anodom iz 1914., peta trioda s torijevom katodom iz god. 1923., a sedma trioda s cilindričnom anodom iz god. 1918. Druga, četvrta i šesta su modernije elektronke (1934.—1935.), pa je prva od njih 4-voltna trioda heksoda, druga 4-voltna heksoda, a treća dvostruka dioda.



Sl. 189.

257. — Anoda je u većini slučajeva *kružnog* ili *pravokutnog presjeka* (sl. 190.). Na sl. 190. vidimo direktno žarenu triodu, kod koje žarna nit ima oblik cik-cak, da bi se povećala aktivna površina niti. Anoda je redovito od željeznog ili nikaljnog lima, a katkad se izvodi i u obliku mreže. Prednost ove posljednje izvedbe je u manjem zagrijavanju, a prema tome i u manjem vraćanju topline na katodu (vidi odsjek 277. i sl. 211.). Za odašiljačke elektronke uzima se kao materijal za anode nikalj, volfram, tantal, i t. d., dakle metali, koji imaju visoku tališnu temperaturu. Često se anode pocrnjuju grafitom, da bi se postiglo što bolje isijavanje topline. Rešetka, odnosno rešetke, izvode se općenito od molibdena. Zbog vrlo malenog razmaka između rešetke i katode (oko 0,1 mm) mora se voditi računa o tome, da se rešetka ne bi prejako zagrijavala, a pogotovo da se ne bi čak užarila, jer tada i ona sama emitira elektrone ometajući na taj način uredan rad elektronke. Radi toga se rešetka učvršćuje na štapove od metala s dobrom toplinskom vodljivošću (bakar, nikalj), na koje se na gornjem kraju pričvršćuje „krilca“ za odvođenje topline.



Sl. 190.

258. — Mnoge elektronke imaju vanjski ili unutarnji metalni oblog *Vanjski oblog* se sastoji od vodljivog sloja cinka koji se oboji i veže na posebni priključak nožišta ili na katodu (vidi priključak M na sl. 189.-b). Ovaj metalni oklop služi kao zaštita od vanjskih električnih polja (vidi odsjek 255.). *Unutarnji oklop* se sastoji od metalnog zrcala, koje posve ili djelomično pokriva unutrašnjost balona, a služi za poboljšanje, odnosno održavanje visokog vakuma. Ovakva metalna zrcala imaju naime svojstvo da upijaju ostatke plina ili plin, koji nastaje tokom rada elektronke (na primjer kod prejakog zagrijavanja anode). Materije koje se za ovo upotrebljavaju i koje imaju ovakva svojstva, nazivaju se geterima (prema eng. getter = proizvođač, u ovom slučaju proizvođač vakuuma). Metal, koji služi kao geter (na primjer magnezijum ili barijum), nalazi se u početku u *geter-patroni* (vidi sl. 186.). Nakon evakuacije elektronke, geter je potrebno ispariti. To se radi tako, da se užari visokofrekventnim strujama izvana; njegove pare se tada slegnu u obliku metalnog zrcala na unutarnje stijenke balona. U dobrim elektronkama pritisak se mora kretati oko 10^{-6} mm s. ž., što odgovara milijardnini normalnog tlaka zraka, jer se tek kod takvog pritiska može računati sa strujom, koja je isključivo elektronska.

Ponavljanje

Kod *indirektno žarenih* katoda aktivni sloj se nalazi na posebnoj cjevčici od niklja, u koju je izolirano smještena žarna nit. Toplina sa žarne niti prenosi se dakle indirektno, preko keramičke mase, na katodu. Moderne katode imaju *bifilarno* namotanu žarnu nit; time se otklanjaju smetnje, koje se pojavljuju kod žarenja izmjeničnom strujom uslijed izmjeničnog magnetskog polja. Vrijeme, koje je potrebno da se katoda dovede na pogonsku temperaturu, skraćeno je kod katoda s brzim žarenjem na nekih 25 s. Moderne elektronke imaju za razliku od starijih *nožište bez nožica*, a dovod k rešetki je izveden na gornjoj strani staklenog balona. *Anode* imaju redovito kružni ili pravokutni presjek, a grade se od lima ili žičane mreže. Zagrijavanje žičane anode je mnogo manje. Preveliko zagrijavanje pojedinih elektroda može se otkloniti grafitiranjem anoda, odnosno postavljanjem krilaca za hlađenje na rešetkama. Većina prijemničkih elektronki *metalizirana* je s *vanjske* i s unutarnje strane. Vanjski oblog služi za zaštitu od štetnih električnih polja, a unutarnji za održavanje vakuuma. Tvari, koje se upotrebljavaju za upijanje ostataka plina, nazivaju se geteri.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kako su u principu građene indirektno žarene katode? *Odgovor:* Kod njih se aktivni sloj nalazi na nikaljnoj cjevčici, koja je izolirana od žarne niti. — *P.:* Koje su prednosti indirektno žarenih katoda? *O.:* One se mogu žariti i izmjeničnom strujom bez štetnog brujanja, a osim toga po čitavoj površini imaju jednaku temperaturu i jednak napon prema rešetki. — *P.:* Zašto se upotrebljava bifilarno namatanje žarne niti? *O.:* Da bi se još više smanjilo brujanje, koje je posljedica magnetskog izmjeničnog polja a osim toga na taj način se postizava i bolje učvršćenje žarne niti. — *P.:* Koje su prednosti nožišta bez nožica? *O.:* Dimenzije elektronki su manje a isto tako su manji i međuelektrodni kapaciteti i mogućnosti odvoda među pojedinim elektrodama. — *P.:* Kakav oblik imaju redovito anode? *O.:* One su cilindričnog ili prizmatičnog oblika. — *P.:* Kako se može smanjiti zagrijavanje anode? *O.:* Tako, da se mjesto limenih anoda upotrijebe mrežaste anode, ili da se anode grafitiraju. — *P.:* Što postizavamo vanjskim metaliziranjem elektronki? *O.:* Zaštićujemo unutrašnje dijelove od štetnih vanjskih električnih polja. — *P.:* Što je svrha unutarnjeg metaliziranja? *O.:* Održavanje vakuuma.

— P.: Što razumijevamo pod „dobrim" vakuumom? *O.*: Vakuum se može smatrati „dobrim", ako je pritisak u elektronki oko 10^{-6} mm s. ž.

Pitanja

94. Kako se može spriječiti prolaz anodne struje kroz triodu usprkos visokom naponu na anodi?

95. Što je bifilarna katoda?

96. Čime se objašnjava manja toplinska tromost katoda koje se brzo užare.

97. Što je geter?

Zadaci

80. Neki prijemnik ima tri univerzalne elektronke s naponom žarenja 13 V i strujom žarenja 200 mA; a) koliki mora biti predotpor u krugu žarenja ako ih želimo žariti strujom iz mreže s naponom 220 V; b) koliki je ukupni učin utrošen na žarenje, c) koliki se učin troši u predotporu?

259. — Sve moderne evropske prijemničke i ispravljačke elektronke označuju se po posebnom ključu, koji je dogovoren od vodećih evropskih tvornica elektronki:

Označno slovo	Označno slovo na prvom mjestu (način žarenja)	Označno slovo na drugom odnosno trećem mjestu (vrst elektronke)
A	4 V (izmjenična struja)	
B		dioda
C	200 mA (istosmjerna ili izmjenična struja) (univerzalna struja)	duodioda
D	1,4 V (baterija)	trioda
E	6,3 V (baterija) (autoserija)	izlazna trioda
H		tetroda
K	2 V (baterija)	heksoda
L	———	oktoda
M	———	izlazna pentoda magično oko
U	100 mA (univerzalna struja)	———
Y	———	jednostrano ispravljanje
Z	———	dvostrano ispravljanje

O tehničkom značenju pojedinih vrsta elektronki bit će govora kasnije. Prijemničke elektronke označuju se s dva, odnosno tri slova i jednim brojem. Prvo slovo označuje napon žarenja, odnosno struju žarenja, dok se drugo slovo odnosi na vrstu elektronke (dioda, trioda, tetroda, i. t. d.) dakle na svrhu, za koju se u prijemniku upotrebljava. Treće slovo označuje upotrebu drugog sistema elektronke, koji je kod višestrukih elektronki smješten u zajednički balon. Broj koji dolazi na posljednje mjesto,

označuje pojedinu izvedbu kod elektronki iste vrste. Tako na primjer oznaka *ACH 1* znači, da se radi o triodi-heksodi s naponom žarenja 4 V (višestruka elektronka); sa *AH 1* označujemo heksodu s katodom, koja se također žari izmjeničnom strujom, napon žarenja 4 V; s *AB 2* se označuje dvostruka dioda opet s 4-voltnim žarenjem. Ove tri elektronke prikazane su u prvom redu na sl. 188. Elektronke s oznakom *A*, *B*, *C*, *E* i *U* imaju indirektno žarene katode, a kod onih s oznakom *H* i *K* katode su žarene direktno.

Ponavljanje

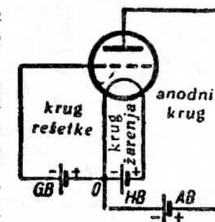
Moderne elektronke za prijemnike označuju se jedinstveno prema posebnom ključu. Prvo slovo određuje vrst žarenja, drugo, odnosno treće, vrstu elektronke, a broj na koncu je broj za raspoznavanje.

Pitanja i odgovori

Pitanje.: Kako se označuju moderne prijemničke elektronke? *Odgovor.*: Pomoću posebnog ključa. — *P.*: Kakva je praktička vrijednost ovog načina označivanja? *O.*: Elektronke su označene jednoznačno obzirom na žarenje i izvedbu samo s dva slova i jednim brojem.

Karakteristika triode

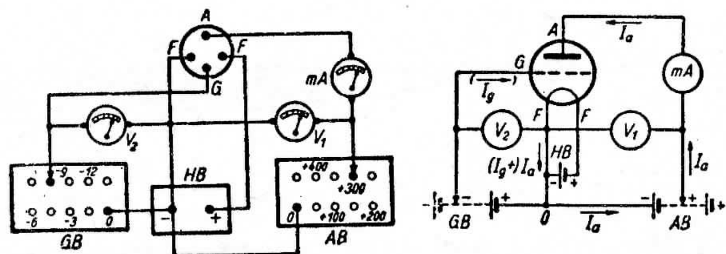
260. — Ponašanje triode kod raznih napona na anodi i na rešetki (prema katodi) dade se prikazati *karakterist. kom*, slično kao i kod diode. Načinimo za tu svrhu podesan uređaj za mjerenje (sl. 192.)! Kako vidimo na sl. 191. kod triode možemo razlikovati tri strujna kruga: 1. krug žarenja s baterijom za žarenje *HB*, 2. anodni krug s anodnom baterijom *AB* i konačno 3. krug rešetke s baterijom *GB*, koja daje napomene za rešetku. Sva tri kruga imaju zajedničku točku (nul-točku), prema kojoj se mjere svi naponi. Na sl. 192. su ovi krugovi dopunjeni voltmetrom V_1 za mjerenje anodnog napona, voltmetrom V_2 za mjerenje napona na rešetki i miliampermetrom *mA* za mjerenje anodne struje. Sl. 192. lijevo prikazuje praktičku izvedbu uređaja, a desno je taj uređaj prikazan shematski. Na prvoj slici imamo umjesto same triode njezino nožište s priključcima za anodu *A*, rešetku *G* i žarnu nit *F*. Anodni napon i napon na rešetki može se mijenjati uticanjem utikača u odgovarajuće priključnice na anodnoj bateriji odnosno na bateriji za napon rešetke.



Sl. 191.

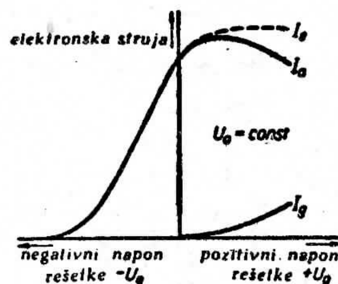
261. — Za početak neka je anodni napon 300 V (između anode *A* i lijevog krila žarne niti *F*). *Negativne* napone na rešetki (između *G* i lijevog kraja žarne niti *F*) uzimat ćemo pri tome različito velike. Ako je negativni napon na rešetki U_g dovoljno velik, ne će teći primjetljiva anodna struja, jer se elektroni iz katode ne će moći uopće gibati prema ovako visokom negativnom naponu. Ako međutim napon na rešetki sma-

njimo, anodna struja će početi teći, jer će sada stanoviti broj elektrona uspjeti doći kroz rešetku na anodu. Što se negativni napon rešetke više približava vrijednosti nula, to veća će biti anodna struja (sl. 193.). Ako



Sl. 192.

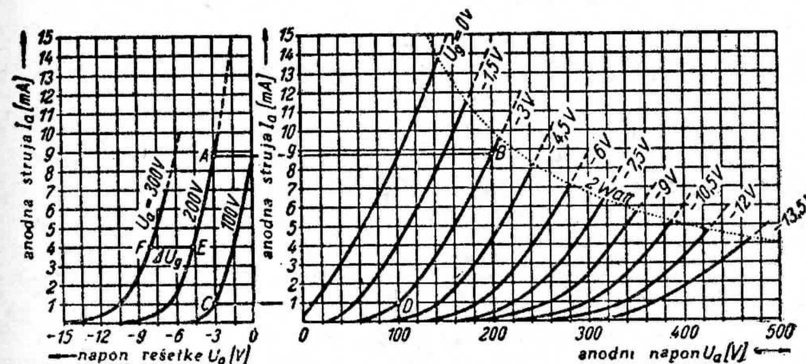
sada promijenimo polaritet baterije *GB*, to jest ako zamijenimo minus-pol s plus-polom, možemo promatrati ponašanje triode i kod *pozitivnog* napona režetke. Pozitivno nabijena rešetka privući će na sebe jedan dio elektrona, pa će i u krugu rešetke teći neka struja rešetke I_g, koju možemo ustanoviti miliampermetrom uključenim u taj krug. Ukupna elektronska struja nije više jednaka I_a, nego imamo $I_e = I_a + I_g$. Anodna struja $I_a = I_e - I_g$ smanjuje se dakle za istu vrijednost, uz koju se struja rešetke povećava. Kod daljnjeg povećavanja pozitivnog napona rešetke konačno ukupna struja I_e postiže vrijednost zasićenja; kod modernih prijemničkih cijevi su normalne pogonske uvjete struja zasićenja se ne postizava ni približno.



Sl. 193.

262. — Što je viši anodni napon U_a, to veća je i anodna struja I_a i to dalje se pomiče karakteristika ulijevo. Na sl. 194. lijevo vidimo više k a r a k t e r i s t i č n i h k r i v u l j a, koje prikazuju ovisnost anodne struje o naponu rešetke (*U_g — I_a-karakteristike)*. Ove karakteristike pripadaju jednoj modernoj triodi. Krivulje su snimljene za razne vrijednosti anodnog napona U_a. Mnogo je instruktivniji drugi način snimanja karakteristika, naime snimanje krivulja, koje pokazuju o v i s n o s t a n o d n e s t r u j e o a n o d n o m n a p o n u uz stalne napone na rešetki (*U_a — I_a-karakteristike)*, kako je to učinjeno na sl. 194, desno. Ovakve krivulje mogu se dobiti ili neposrednim mjerenjem ili iz U_g — I_a-karakteristika. Moramo li na primjer konstruirati U_a — I_a-karakteristiku za $U_g = -3V$, tada ćemo na U_g — I_a-karakteristici odrediti točku *A*, koja odgovara naponu $U_a = 200$ V i $U_g = -3$V, pa iz te točke povući paralelu s horizontalnom osi, dok ne presječe okomicu podignutu u točki 200 V na sl. 194, desno. Na taj način dobivamo točku *B*. Istu stvar možemo načiniti i za $U_a = 100$ V, pa iz točke *C* dobivamo točku *D*, i t. d. Kroz točke *B* i *D* možemo povući krivulju, koja će nam pokazivati ovisnost

anodne struje o anodnom naponu za napon na rešetki $U_g = -3$ V. Jasno je samo po sebi, da iz krivulja u koordinatama U_a — I_a možemo dobiti i krivulje u koordinatama U_g — U_a, i da će traženje krivulje biti to točnije što više krivulja imamo na drugoj strani. Na sl. 194. desno vidimo konačno



Sl. 194.

točkasto izvučenu krivulju označenu s „2 W" (hiperbola) Ta krivulja je g r a n i č n a k r i v u l j a za maksimalnu dopustivu anodnu struju. Ako je naime struja kod danog anodnog napona prevelika, elektroni udarajući u anodu će je odviše ugrijati, uslijed čega dolazi do ispuštanja ostatka plina i do pojava, koje ometaju pravilan rad elektronke i opasne su po njeno trajanje. Za svaku elektronku je radi toga propisan m a k s i m a l n i d o p u s t i v a n o d n i u č i n = a n o d n i n a p o n × a n o d n a s t r u j a ($N = U_a \cdot I_a$ [W]) U našem primjeru je taj učin 2 W, na primjer: 200 V × 10 mA = 2000 mW = 2 W.

263. — Struja rešetke se zbog pravilnog rada elektronke u prijemniku i pojačalima mora svakako izbjegavati. Savršeno izbjeći struju rešetke nije moguće, jer pojedini elektroni, zbog svoje velike brzine, kojom izađu iz katode, mogu da se gibiju i pvotiv vrlo velikih negativnih napona na mrežici (do kojih —50 V). Struja rešetke je međutim u tom slučaju tolika, da se jedva dade mjeriti. Potrebno je napomenuti, da se kod indirektno žarenih elektronki primjetne rešetkine struje pojavljuju već kod napona rešetke —1,3 V, kod elektronki koje se direktno žare izmjeničnom strujom, kod nekih —2 V, a kod direktno žarenih baterijskih elektronki kod 0 V. Kao točka, kod koje počinje struja rešetke, uzima se onaj negativni napon na rešetki, kod kojeg struja rešetke ima vrijednost $I_g = 0{,}003$ mA. Kod modernih prijemničkih elektronki imamo međutim kod napona $U_g = -1{,}3$ V struju rešetke maksimalne jakosti 0,0003 mA, a ta se praktički može uvijek zanemariti.

Ponavljanje

Kod triode razlikujemo tri strujna kruga: krug žarenja, anodni krug i krug rešetke. Djelovanje elektronke može se vidjeti iz *karakteristike* koja pokazuje ovisnost *anodne struje o naponu rešetke*, a još bolje iz *ka*

rakteristike, koja pokazuje ovisnost *anodne struje o anodnom naponu* uz stalni napon rešetke. Jedna vrst karakteristika može se lako izvesti iz karakteristika druge vrsti. Za svaku elektronku propisano je *maksimalno anodno opterećenje*, koje se ne smije prekoračiti, da se anoda ne bi suviše ugrijala. Osim toga ne smije ni *struja rešetke* u pogonskom stanju premašiti neku određenu, vrlo malenu vrijednost. Radi toga mora negativni napon na rešetki biti uvijek dovoljno velik.

Pitanja i odgovori

Pitanje.: Koje strujne krugove razlikujemo kod triode? *Odgovor.*: Krug žarenja, anodni krug i krug rešetke. — *P.*: Kakav je utjecaj negativnog napona rešetke na anodnu struju? *O.*: Što negativni napon na rešetki ima višu vrijednost, to je manja anodna struja. — *P.*: Kakvo je djelovanje pozitivnog napona na rešetki? *O.*: S porastom pozitivnog napona na rešetki ne raste anodna struja više tako jako, a konačno počne i opadati, jer prema pozitivnoj rešetki počinje teći znatna struja. — *P.*: Koje su dvije najvažnije karakteristike elektronki? *O.*: Karakeristika anodni napon—anodna struja i karakteristika napon rešetke—anodna struja. — *P.*: Što vidimo iz karakteristika? *O*: Vidimo, na koji se način mijenja anodna struja u ovisnosti o anodnom naponu odnosno naponu na rešetki. — *P.*: Što smo čuli o opterećenju anode? *O.*: Anodni učin = anodni napon × anodna struja ne smije prijeći stanovitu vrijednost, da se anoda elektronke ne bi suviše ugrijala. — *P.*: Što razumijevamo pod točkom početne struje rešetke? O.: Negativni napon rešetke, kod kojeg struja rešetke ima vrijednost 0,003 mA.

Pitanja

98. Kako se očituje povećanje anodnog napona kod karakteristike napon rešetke—anodna struja)

99. Kako se mijenja struja rešetke kod triode?

Zadaci

81. Kakve su elektronke: AC 2, ABC 1, AD 1, CL 4. CF 7, KB 2, EK 1, CY 2?

82. — Koliki je ukupni učin, koji se troši na žarenje elektronki prijemnika s tri elektronke iz U-serije, prema učinu žarenja prijemnika s tri elektronke iz *C*-serije uz napon mreže 220 V?

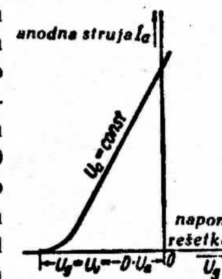
Prohvat, strmina i unutarnji otpor elektronke

264. — Na elektrone, koji izlaze iz katode, ne djeluje samo napon na rešetki, nego i napon na anodi. Djelovanje anodnog napona ne može međutim posve doći do izražaja, jer samo jedan dio električnih silnica može od pozitivne anode proći kroz rešetku, koja je nabijena negativno i dati elektronima ubrzanje. Na elektrone ne će dakle djelovati samo napon rešetke

U_g, nego također i dio napona anode U_a. Označimo li taj dio napona sa $D \cdot U_a$, to će aktivni napon na rešetki biti:

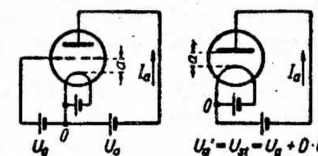
$$U_{st} = U_g + D \cdot U_a \quad \quad (87)$$

Vrijednost D naziva se prohvatom[1] i većinom naznačuje u postocima. *Prohvat nam prema tome daje vrijednost onog dijela anodnog napona, koji bi priveden rešetki imao isto djelovanje na elektronsku struju, kao čitavi napon na anodi.* Ima li na primjer neka elektronka prohvat 4%, onda to znači da napon od + 100 V na anodi ima isto djelovanje, kao napon od + 4 V na rešetki. Ako odaberemo napon rešetke $U_g = -4$ V, bit će prema jednadžbi (87) aktivni napon $U_{st} = -4 + 0{,}04 \cdot 100 = 0$ to jest ne će teći nikakva anodna struja. Općenito će za napon na rešetki $U_g = -D \cdot U_a$ anodna struja qiti jednaka nuli, pa će u ovoj točki na U_g-osi biti početak *U_g—I_a-karakteristike* (sl. 195). Napon na rešetki $U_g = -D \cdot U_a$ naziva se naponom pomaka U_v, jer je točka, u kojoj počinje anodna struja, za veličinu ovog napona pomaknuta prema nul-točki nalijevo.



Sl. 195.

265. — Iz ovoga, što je dosad rečeno, može se vidjeti, *da se trioda obzirom na struju može zamijeniti diodom, koja se anoda nalazi na mjestu rešetke triode, a anodni napon joj je jednak aktivnom naponu U_{st} triode* (sl. 196.) Uz ovu pretpostavku mogu se sva razmatranja, koja smo imali u vezi s diodom, prenijeti i na triodu. Za ukupnu elektronsku struju I_e u [A] triode imamo prema jednadžbi (86) i jednadžbi (87):



Sl. 196.

$$I_e = k \cdot U_{st}^{\frac{3}{2}} = k \cdot (U_g + D \cdot U_a)^{\frac{3}{2}} \quad \quad (88)$$

Vrijednost k se praktički dosta točno podudara s vrijednošću k u jednadžbi (86) i odsjeku 248. Jednadžba (38) vrijedi isto kao i jednadžba (86) samo u području prostornog naboja, dakle samo za pozitivne aktivne napone U_{st} koji leže između vrijednosti nula i napona zasićenja U_s.

266. — Ako je poznat napon U_a, iz napona pomaka može se izračunati $U_v = -D \cdot U_a$. Ovaj postupak daje u donjim dijelovima karakterističnih

[1]) U literaturi na engleskom jeziku ne upotrebljava se prohvat D nego faktor pojačanja μ, gdje je $\mu = 1/D$.

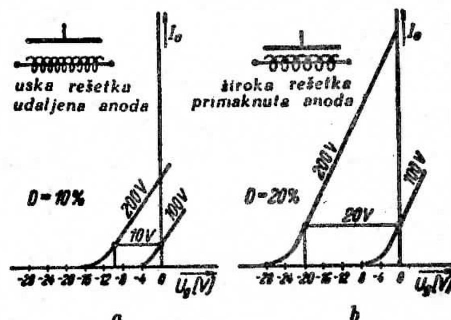
krivulja dosta netačne rezultate, i to zbog zakrivljenosti krivulja, pa se ne preporuča. Iz sl. 197. vidimo, da u točki A krivulje za $U_{a1} = const$ imamo istu anodnu struju kao u točki B krivulje za $U_{a2} = const$ Povišenje anodnog napona za iznos $\Delta U_a = U_{a2} - U_{a1}$ dade se izravnati povišenjem negativnog napona rešetke za iznos $\Delta U_g = U_{g2} - U_{g1}$. Na sl. 194. lijevo iznosi na primjer ΔU_a za krivulje, koje prolaze kroz E i F, 100 V, a ΔU_g je 3,3 V. Drugim riječima: Promjena anodnog napona za ΔU_a = 100 V ima isto djelovanje kao promjena napona na rešetki za ΔU_g = = 3,3 V = 3,3% od ΔU_a. Prema odsjeku 264. bit će prema tome za ovu elektronku D = 3,3% = 0,033, ili posve općenito·

Sl. 197.

$$D = \frac{\Delta U_g}{\Delta U_a} = \frac{\text{promjena napona na rešetki}}{\text{promjena napona na anodi}} \quad (\text{uz } I_a = const)$$

Da bi dakle prohvat mogli odrediti što točnije, moramo anodni napon promjeniti za stanoviti, dosta veliki iznos (na pr. 100 V). Tada napon na rešetki mijenjamo dotle, dok opet ne dobijemo istu struju. Odnos ovih dviju promjena napona daje nam prema jednadžbi (89) traženi prohvat. Moramo međutim primjetiti, da *prohvat nije* za istu elektronku *neka stalna vrijednost*. To se može zaključiti i odatle, što karakteristične krivulje nemaju svuda isti međusobni razmak, nego su, naročito u blizini osi U_g više razmaknute (vidi 194. lijevo. Uslijed toga će na tim mjestima prohvat biti veći, nego na strmijim i ravnim dijelovima krivulja. Ova se pojava, koja se naročito primjećuje kod malenih anodnih struja, može uglavnom pripisati djelovanju prostornog naboja.

267. — Prohvat elektronke ovisan je o međusobnom razmaku navoja rešetke i o udaljenosti rešetke od anode. Što su navoji rešetke jedan drugome bliži i što je rešetka dalje od anode, to m a n j i je prohvat U takvom slučaju je djelovanje anodnog napona kroz rešetku razmjerno slabo. Također razmak između pojedinih $U_g - I_a$-karakteristika je u ovom slučaju manji (sl. 198.-a). Obrnuto, što su navoji rešetke jedan od drugoga dalje, i što je rešetka bliža anodi (sl. 198.-b), to će prohvat biti veći. Što je m a n j i prohvat elektronke, to će m a n j a biti anodna struja nekog stalnog anodnog napona, ali na anodnu struju to jače će djelovati promjene napona na rešetki. To praktički znači, da će elektronka s manjim prohvatom imati veće



Sl 198.

pojačanje. Obične triode za pojačala i prijemnike imaju prohvat od 1 do 30%, a odašiljačke od 0,1 do 10%.

Ponavljanje

Na elektronsku struju, koja teče kroz triodu, djeluje napon rešetke U_g i dio anodnog napona $D \cdot U_a$. Stvarni napon, koji djeluje na rešetku, to jest *aktivni napon* U_{st} bit će prema tome: $U_{st} = U_g + D \cdot U_a$. Udio D, kojim anodni napon djeluje kroz rešetku, naziva se *prohvatom* triode. Triodu se dade nadomjestiti diodom, koja ima anodni napon jednak aktivnom naponu triode, a anoda joj se nalazi na mjestu rešetke triode. Uz *napon pomaka* $U_g = U_v = -D \cdot U_a$ anodna struja je jednaka nuli. Prohvat pokazuje za koliko se uz stanovitu promjenu anodnog napona mora promijeniti napon na rešetki, a da anodna struja zadrži istu vrijednost. Prema tome je $D = \Delta U_g / \Delta U_a$ uz $I_a = const$. Što je veći prohvat, to manje je pojačanje elektronke, i to veći je razmak između njezinih karakterističnih krivulja.

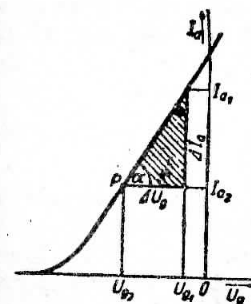
Pitanja i odgovori

Pitanje: Koliki je aktivni napon triode? *Odgovor:* $U_{st} = U_g + D \cdot U_a$. — *P.:* Kakvo značenje ima dio napona $D \cdot U_a$? *O.:* On nam pokazuje kolikim svojim dijelom anodni napon djeluje na ubrzanje elektrona. — P.: Kako se naziva D? *O.:* Prohvat elektronke. — *P.:* Kako se prohvat računa? *O.:* Prohvat je jednak odnosu promjene napona na rešetki prema promjeni napona na anodi uz nepromjenljivu anodnu struju. — *P.:* Što razumijevamo pod naponom pomaka? *O.:* Napon na rešetki $U_g = -D \cdot U_a$, koji anodnu struju smanjuje praktički na nulu. — *P.:* O čemu je ovisan prohvat triode? *O.:* O međusobnom razmaku navoja rešetke i o udaljenosti rešetke od anode. — *P.:* Kako djeluje maleni prohvat na $U_g - I_a$-karakteristiku? *O.:* Međusobna udaljenost krivulja je malena. — *P.:* Koliki je prohvat običnih trioda? *O.:* On se kreće od 1% do 30%, odnosno od 0,01 do 0,3.

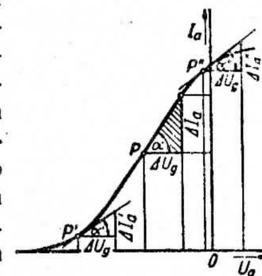
268. — Za uzbudno djelovanje rešetke vrlo je važna s t r m i n a S karakteristične krivulje. Pod strminom razumijevamo *odnos promjene anodne struje* ΔI_a *prema promjeni napona na rešetki* ΔU_g *uz stalni anodni napon* U_a, dakle odnos (sl. 199.):

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} = \frac{\text{promjena anodne struje}}{\text{promjena napona na rešetki}} \quad (\text{uz } U_a = const) \quad . \; . \; (90)$$

Za praktičko određivanje strmine potrebno je napon na rešetki promijeniti za neki iznos i izmjeriti promjenu anodne struje, koja uslijed toga nastaje Odnos ovih dviju promjena daje nam prema jednadžbi (90) traženu strminu, uz uvjet da je anodni napon za vrijeme mjerenja ostao isti. Mjerenja daju međutim točne vrijednosti samo onda, ako su ta mjerenja izvedena na ravnom dijelu $U_g - I_a$-karakteristike. Strmina $S = \Delta I_a / \Delta U_g$ određuje, strogo uzevši, smjer tangente u odgovarajućoj točki krivulje P, dakle tangens kuta, što ga tangenta zatvara s U_g-osi:

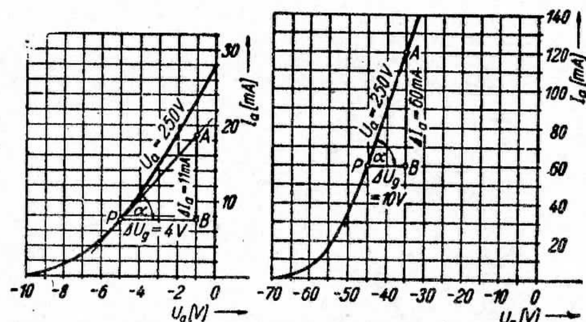


Sl. 199.



Sl. 200.

$S = tg\ \alpha$ (sl. 200.). Da dakle odredimo strminu u „radnoj točki" na z a k r i v l j e n o m dijelu krivulje, moramo položiti tangentu kroz tu točku kako je to na primjer učinjeno za točke P' i P'' na sl. 200., gdje imamo $S' \Delta I'_a / \Delta U_g$ i $S'' = \Delta I''_a / \Delta U_g$. Odavde slijedi da ni *strmina nije stalna vrijednost*, jer je prema sl. 200. na gornjem i donjem zakrivljenom dijelu krivulje mnogo manja, nego na srednjem ravnom dijelu. Davanje vrijednosti strmine (obično u [mA/V]) ima smisla samo onda, ako se istodobno naznači, za koju točku to vrijedi. Na sl. 201. imamo dvije krivulje različitih strmina.



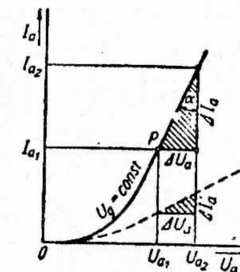
Sl. 201.

Lijeva ima u radnoj točki P strminu $S = AB/BP = 11/4 = 2{,}75$ mA/V, dok desna ima strminu $S' = AB/B^{\prime} = 60/10 = 6{,}0$ mA/V. Promjena napona na rešetki za 1 V uzrokuje kod strmije krivulje oko 2,2 puta veću promjenu anodne struje, nego što je promjena anodne struje kod krivulje, koja ima manju strminu. Ove činjenice bit će nam kasnije, kad budemo govorili o elektronkama kao pojačalima, od velikog značenja. Strmina elektronke je to v e ć a, što je v e ć a površina katode, koja emitira i m a n j a udaljenost rešetke od katode, što je dakle m a n j i radius rešetke. Normalne prijemničke elektronke imaju strminu od kojih 0,3 do 10 mA/V.

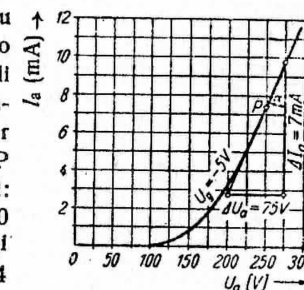
269. — Treći od osnovnih pojmova je u n u t a r n j i o t p o r R_i. *Pod unutarnjim otporom razumijevamo odnos promjene anodnog napona* ΔU_a *prema promjeni anodne struje* ΔI_a *uz stalni napon na rešetki* U_g, dakle odnos:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{\text{promjena anodnog napona}}{\text{promjena anodne struje}} \quad (\text{uz } U_g = const) \quad . \ . \ (91)$$

Unutarnji otpor se najlakše dobiva iz $U_a - I_a$-karakteristika (usporedi sl. 194. desno) kako se to vidi na sl. 202. Tu je $R_i = \Delta U_a / \Delta I_a = tg\ \alpha$, ako je α kut, što ga zatvara tangenta položena kroz radnu točku prema I_a-osi. Da odredimo veličinu R_i, moramo izmjeriti, za koliko se mijenja anodna struja uz stalan napon na rešetki, ako se anodni napon promijeni za neku stanovitu vrijednost. Kvocijent ovih dviju veličina daje traženi unutarnji otpor. Isto kao i kod ostalih dviju vrijednosti, *ni unutarnji otpor nije stalna veličina*, nego je ovisan o položaju radne točke. Što su položitije $U_a - I_a$-karakteristike, to je veći unutarnji otpor, jer u tom slučaju promjeni anodnog napona U_a odgovara malena promjena anodne struje I_a (usporedi crtkanu krivulju na sl. 202.). Unutarnji otpor R_i ne smijemo nikako zamijeniti s otporom R, što ga elektronka pruža istosmjernoj struji. Ovaj otpor je naime prema Ohmovom zakonu $R = U_a / I_a$, a ima vrijednosti ovisne o naponu na rešetki i o ostalim radnim uvjetima. Moramo napomenuti, da unutarnji otpor igra vrlo važnu ulogu onda, kad kroz elektronku teče *izmjenična struja*; prema tome to nije otpor za istosmjernu, nego za i z m j e n i č n u s t r u j u. Ipak se tu ne radi ni o radnom, ni o induktivnom, ni o kapacitivnom otporu, nego o omskom otporu za izmjeničnu struju. Kako se iz jednadžbe (89) do (91) jasno vidi, nisu mjerodavni *istosmjerni* naponi ili *istosmjerne* struje, nego *promjene* struja i napona. Tako na primjer u n u t a r n j i o t p o r za karakteristiku na sl. 203. u radnoj točki P (položiti tangentu kroz radnu točku!) iznosi: $R_i = tg\ \alpha = \Delta U_a / \Delta I_a = 75$ V/0,007 $A \approx 10710$ $\Omega = 10{,}7$ kΩ. Za otpor i s t o s m j e r n o j struji imali bi međutim: $R = U_a / I_a = 250$ V/0,0074 A $\approx$ 33.800 Ω = 33,8 kΩ. Vidimo dakle, da se ova dva otpora međusobno znatno razlikuju. Otpor R nije u radiotehnici zanimljiv za praksu.



Sl. 202.



Sl. 203.

270. — Između prohvata D, strmine S u [A/V] i unutarnjeg otpora R_i u [Ω] postoji uska veza. Iz jednadžbe (91) i (89) imamo $\Delta I_a = \Delta U_a / R_i$ i $\Delta U_g = D \cdot \Delta U_a$; ako ove vrijednosti uvrstimo u jednadžbu (90) dobivamo:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} = \frac{\Delta U_a / R_i}{D \cdot \Delta U_a} = \frac{\Delta U_a}{R_i \cdot D \cdot \Delta U_a} = 1/R_i \cdot D$$ ili poznatu B a r k h a u s e n - o v u j e d n a d ž b u:

$$\boxed{S \cdot D \cdot R_i = 1} \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ (92)$$

Ova jednadžba vrijedi općenito i nije vezana ni za kakve fizikalne pretpostavke; važno je samo to, da se sve tri veličine odnose na istu radnu točku. Ako su poznate dvije veličine, pomoću jednadžbe (92) može se izračunati treća. Gornju jednadžbu možemo provjeriti za istu elektronku na sl. 194. (lijevo), sl. 201. (lijevo) i sl. 203., pa dobivamo iz $D = 0{,}033$ (odsjek 266.), $S = 2{,}75$ mA/V = 0,00275 A/V (odsjek 268.) i $R = 10710\ \Omega$ (odsjek 269.): $S \cdot D \cdot R_i = 0033 \cdot 0{,}00275 \cdot 10710 = 0{,}97 \approx 1$.

Ponavljanje

Strmina S elektronke daje odnos promjene anodne struje ΔI_a prema promjeni napona na rešetki ΔU_g, uz stalni anodni napon: $S = \Delta I_a / \Delta U_g$. Strmina je ovisna o zakrivljenosti krivulje u radnoj točki, pa prema tome nije konstantna. *Unutarnji otpor R_i* je odnos promjene anodnog napona ΔU_a prema odgovarajućoj promjeni anodne struje ΔI_a, uz konstantni napon na rešetki: $R_i = \Delta U_a / \Delta I_a$. I unutarnji otpor je ovisan o radnim uvjetima, pa prema tome također nije konstantna veličina. Za razliku od otpora elektronke za istosmjernu struju $R = U_a / I_a$ unutarnji otpor R_i je *otpor za izmjeničnu* struju. R i R_i mogu imati međusobno vrlo različne vrijednosti. Produkt triju karakterističnih veličina, naime strmine (u A/V), prohvata i unutarnjeg otpora (u Ω) uvijek je jednak 1, dakle: $S \cdot D \cdot R_i = 1$ (B a r k h a u s e n - o v a j e d n a d ž b a).

Pitanja i odgovori

Pitanje: Kako se određuje strmina karakteristike? *Odgovor:* Mjerenjem veličine promjene anodne struje, koja odgovara nekoj promjeni napona na rešetki uz stalni anodni napon. Kvocijent ovih dviju veličina je strmina. — *P.*: Je li ovaj način određivanja mjerenjem uvijek točan? *O.*: Točan je samo kad se mjerenje vrši na ravnom dijelu krivulje, a inače je strmina jednaka tangensu kuta, što ga tangenta u radnoj točki zatvara s U_g-ovim. — *P.*: Što razumijevamo pod unutarnjim otporom? *O.*: Odnos promjene anodnog napona prema odgovarajućoj promjeni anodne struje uz stalan napon na rešetki. — *P.*: Kako se mijenja unutarnji otpor s položajem radne točke na krivulji? *O.*: Unutarnji otpor je veći, kad se radna točka nalazi na položitijem dijelu $U_a - I_a$-karakteristike, nego kad se nalazi na strmijem dijelu. *P.*: Kakav otpor pretstavlja unutarnji otpor elektronke? *O.*: To je omski otpor za izmjeničnu struju — *P.*: Čime se ovaj otpor ne smije zamijeniti? *O.*: Omskim otporom za istosmjernu struju. — *P.*: Koja jednadžba povezuje sve tri karakteristične veličine, naime strminu, prohvat i unutarnji otpor elektronke? *O.*: Barkhausenova jednadžba: $S \cdot D \cdot R_i = 1$.

Pitanja

100. Navedi jednadžbe za prohvat, strminu i unutarnji otpor elektronke!

101. Zašto ove tri veličine nisu konstantne?

102. Kako se određuje unutarnji otpor elektronke za zakrivljeni dio krivulje.

Zadaci

83. Koliki mora biti anodni napon triode s prohvatom 6%, ako aktivni napon mora biti 10,4 V uz napon na rešetki —4 V, i kod kojeg napona rešetke anodna struja prestaje teći.

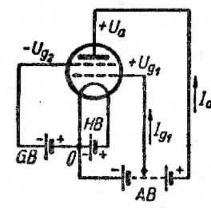
84. Mjerenja na ravnom dijelu krivulje neke triode dala su slijedeće vrijednosti: kod anodnog napona 100 V anodnu struju 5,75 mA, odnosno 1,25 mA uz napon na rešetki 0 V, odnosno 2 V, a isto tako kod anodnog napona 200 V anodnu struju 9 mA, odnosno 4,5 mA, uz napon na rešetki —2 V, odnosno —4 V; a) nacrtaj oba ravna dijela $U_g - I_a$-karakteristike; b) odredi strminu, unutarnji otpor, otpor za istosmjernu struju i prohvat triode!

85. Koliki je unutarnji otpor triode, koja ima prohvat 29% i strminu 2,5 mA/V u radnoj točki?

271. — Triode, o kojima smo do sada govorili, izgubile su u modernoj radiotehnici nešto od svog značenja, jer su ih zamijenile *višepolne elektronke*, odnosno *elektronke s više rešetki*. Prednosti ovakvih elektronki mogu se međutim ispravno ocijeniti tek onda, kad se vidi njihovo djelovanje u prijemnicima, pa ćemo se ovde pozabaviti samo bitnijim osebinama ovih elektronki, a ostale pojedinosti vidjet ćemo kasnije u II. dijelu.



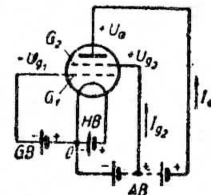
Sl. 204.



Sl. 205.

Višepolne elektronke su elektronke s v i š e r e š e t - k i. Kod njih je broj elektroda dakle veći od tri. U biti možemo razlikovati *tetrode*, to jest elektronke s dvije rešetke, *pentode* ili elektronke s tri rešetke, *heksode* ili elektronke s četiri rešetke, *oktode* ili elektronke sa šest rešetki.

272. Kako znamo iz odsjeka 247. *prostorni naboj*, koji se nalazi oko katode predstavlja zapreku za elektronsku struju, koja se može svladati tek dovoljno visokim anodnim naponom. Djelovanje prostornog naboja može se prema *Schottkyju* (1913. g.) otkloniti također uvođenjem r e š e t k e z a p r o s t o r n i n a b o j G_1 između katode K i uzbudne rešetke G_2 (sl. 204.). Ovakve elektronke su poznate pod imenom *elektronke s dvije rešetke*. Ako na rešetki za prostorni naboj imamo stalni pozitivni napon U_{g1} (sl. 204.), tada će ova elektroda privlačiti elektrone, te se oblak, što ga predstavlja prostorni naboj, ne će moći stvoriti. Dio elektrona će teći preko ove pozitivne rešetke i stvarati *struju prostornog naboja* I_{g1}, dok će drugi dio elektrona na poznat način teći prema anodi kao *anodna struja* I_a. Rešetka G_1 preuzimat će prema tome dio radnje od anode i trošit je na otklanjanje prostornog naboja. Zbog ove podjele rada moći će anodni napon biti znatno niži (2 do 20 V), a da pri tome strmina ne bude ništa manja od strmine odgovarajuće triode, koja radi s mnogo višim anodnim naponom. Zbog niskog anodnog napona (malena anodna baterija (prije su se često ovakve elektronke s dvije rešetke upotrebljavale u malenim prenosnim i putnim prijemnicima.



Sl. 206.

273. — Prema odsjeku 264. i jednadžbe 87 aktivni napon je sastavljen od napona na uzbudnoj rešetki i dijela anodnog napona: $U_{st} = U_{g2} + D \cdot U_a$. Radi toga će svaka promjena anodnog napona uzrokovati promjene anodnog napona. Ova pojava, nazvana p o v r a t n o d j e l o v a n j e a n o d e, štetna je za rad elektronke, što ćemo kasnije u drugom dijelu razmotriti detaljnije. Što je manji prohvat D, to manji je i produkt $D \cdot U_a$, a time i samo povratno djelovanje. Nema međutim nikakvog smisla uzimati gusto motanu uzbudnu rešetku, da bi se

smanjio prohvat, jer je u tom slučaju potreban vrlo visok anodni napon, da se postigne ista strmina. Češće se prema *Schottkyju* (1916. g.), umeće između anodne i uzbudne rešetke *zaštitna rešetka*, pa se na taj način dobivaju *elektronke sa zaštitnom rešetkom* (*tetrode*) Također i zaštitna rešetka ima, kao i prije rešetka prostornog naboja, *pozitivan* napon, koji međutim mora biti uvijek niži od anodnog napona. Elektroni se sada nakon zadržavanja pred negativnom uzbudnom rešetkom G_1 (sl. 206.), radi djelovanja pozitivnog napona na anodi i zaštitnoj rešetki, kreću velikom brzinom prema zaštitnoj rešetki G_2. Veći dio njih prolazi kroz tu rešetku i dospijeva na anodu. Tako osim anodne struje I_a imamo i *struju zaštitne rešetke* I_{g2}. Što je anodni napon U_a veći prema naponu zaštitne rešetke U_{g2}, to manja će biti struja zaštitne rešetke. Pomoću zaštitne rešetke postizava se znatno povećanje strmine uz *maleni* prohvat (vidi odsjek 274.), tako da elektronke sa zaštitnom rešetkom rade dobro već kod anodnih napona od 100 do 200 V.

274. — Uz anodni napon U_a i napon zaštitne rešetke U_{g2}, ne uzevši u obzir uzbudnu rešetku, dobivamo prema jednadžbi (87) aktivni napon $U'_{st} = U_{g2} + D_1 \cdot U_a$, ako je $D_1 = \Delta U_{g2}/\Delta U_a$ prohvat anode prema zaštitnoj rešetki u radnoj točki. Iz ovog aktivnog napona i napona na uzbudnoj rešetki dobivamo konačni aktivni napon $U_{st} = U_{g1} + D_2 \cdot U'_{st}$, gdje je $D_2 = \Delta U_{g1}/\Delta U_{g2}$. Iz toga dobivamo za ukupni aktivni napon vrijednosti. $U_{st} = U_{g1} + D_2 \, (U_{g2} + D_1 \cdot U_a)$ ili:

$$\boxed{U_{st} = U_{g1} + D_2 \cdot U_{g2} + D_1 \cdot D_2 \cdot U_a} \quad . \; . \; . \; . \quad (93)$$

Ovaj aktivni napon određuje anodnu struju elektronke sa zaštitnom rešetkom isto tako, kao i odgovarajući napon kod triode. Napon pomaka je u ovom slučaju prema odsjeku 264.: $U_{g1} = -(D_2 \cdot U_{g2} + D_1 \cdot D_2 \cdot U_a)$. Ako je napon na uzbudnoj rešetki jednak naponu pomaka, anodna struja jednaka je nuli. Član $D_1 \cdot D_2 \cdot U_a$ daje ukupni utjecaj anodnog napona na anodnu struju, dakle i *ukupni prohvat* D. Prema tome je kod tetroda: $D = D_1 \cdot D_2$, jer je $D = D_1 \cdot D_2 = (\Delta U_{g2}/\Delta U_a) \cdot (\Delta U_{g1}/\Delta U_{g2}) = \Delta U_{g1}/\Delta U_a$. Da bi se postigao maleni prohvat D (veliko pojačanje!), izvode se tetrode tako, da je prohvat anode prema zaštitnoj rešetki D_1 malen (gusto motana rešetka), a prohvat anode prema uzbudnoj rešetki D_2 velik (rijetko motana rešetka). Uslijed toga se dobiva veliki napon pomaka, a prema tome i veliko uzbudno područje. Na ovaj način se ukupni prohvat može svesti na vrijednost manju od 1%, što prema jednadžbi (92) znači da će i unutarnji otpor tetroda moći biti vrlo velik. Ovdje napominjemo još jednom, da se svi dodaci o prohvatu, strmini i unutarnjem otporu mogu smatrati jednoznačnim samo onda, kad je označena i radna točka, na koju se odnose.

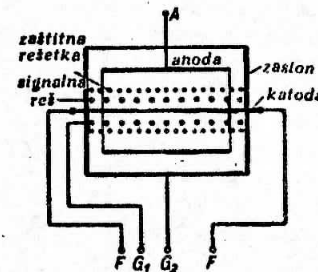
Ponavljanje

Elektronke s *dvije rešetke* imaju između katode i uzbudne rešetke još jednu rešetku, koja leži na pozitivnom naponu i naziva se *rešetkom prostornog naboja*. Zahvaljujući ovoj rešetki i kod malenih anodnih napona može se postići velika strmina. Druga vrsta elektronki s dvije rešetke jesu *elektronke sa zaštitnom rešetkom*, kod kojih se između anodne i uzbudne rešetke nalazi pozitivno nabijena zaštitna rešetka. Ova rešetka znatno smanjuje prohvat elektronke dajući joj veću strminu; radi toga ovakve elektronke imaju i veće pojačanje, nego triode. Prohvat D anode prema uzbudnoj rešetki jednak je (za određenu radnu točku) umnošku prohvata D_1 anode prema zaštitnoj rešetki i prohvata D_2 zaštitne rešetke prema uzbudnoj rešetki.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Što su elektronke s više od tri elektrode? *Odgovor:* To su elektronke s više od jedne rešetke, dakle elektronke s više rešetki — *P.:* Čime se razlikuje elektronka s dvije rešetke od triode? *O.:* Kod nje se između uzbudne rešetke i katode nalazi još jedna rešetka, naime rešetka prostornog naboja — *P.:* Koju svrhu ima ova rešetka? *O.:* Svojim pozitivnim naponom ona uklanja prostorni naboj. — *P.:* Koje su prednosti s tim u vezi? *O.:* Anodni napon može biti znatno niži (? do 20 V). — *P.:* Kakav utjecaj ima povratno djelovanje anode? *O.:* Svaka promjena anodnog napona uzrokuje promjenu aktivnog napona. — *P.:* Kako se može smanjiti povratno djelovanje anode? *O.:* Umetanjem zaštitne rešetke između anode i uzbudne rešetke. — *P.:* Kako se zovu ovakve elektronke? *O.:* Tetrode ili elektronke sa zaštitnom rešetkom. — *P.:* Što se još postizava zaštitnom rešetkom? *O.:* Znatno smanjenje prohvata elektronke i povećanje strmine. — *P.:* Čemu je u ovom slučaju jednak prohvat? *O.:* Jednak je produktu prohvata anode prema zaštitnoj rešetki i prohvata zaštitne rešetke prema uzbudnoj rešetki.

275. — One elektrode u elektronki, koje se nalaze jedna blizu druge, tvore maleni kondenzator s kapacitetom od nekoliko pikofarada. Naročito je važan *kapacitet anoda-rešetka* između anode i uzbudne rešetke. Za *visoke frekvencije* ovakvi maleni kapaciteti predstavljaju neznatan otpor, te promjene anodnog napona u visokofrekventnom ritmu djeluju na rešetku. Ova pojava može štetno utjecati na rad visokofrekventnih pojačala. Da se to spriječi, grade se zaštitne rešetke s gustim navojima, a priključci za anodu i uzbudnu rešetku smještaju se jedan od drugoga što dalje, na primjer tako, da se izvod uzbudne rešetke načini na vrhu balona, a izvod anode na nožištu (vidi odsjek 256. i sl. 188.). Kako zaštitna rešetka ne oklapa anodu potpuno, jedan dio električnih silnica dolazi do uzbudne rešetke izvan puta, kojim se giblju elektroni, dakle mimo zaštitne rešetke. I ovo se međutim može spriječiti tako, da se zaštitnoj rešetki doda metalni nastavak (sl. 207.), pa se na taj način dobiva *zaslonska rešetka*. Zaslonska rešetka omogućuje dakle praktički posvemašnje zaslanjanje polja anode prema uzbudnoj rešetki.

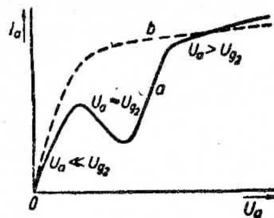


Sl. 207.

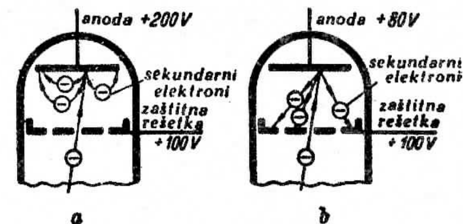
Pomoću zaslonske rešetke i vanjskim metalnim plaštem (vidi odsjek 258.), koji se spaja s katodom, štetni kapacitet između anode i uzbudne rešetke može se svesti na manje od 0,003 pF, a pri tome je ukupni prohvat elektronke manji od 0,1%. Kod *pojačala za visoke frekvencije* je električko (kapacitivno) oklapanje anode prema uzbudnoj rešetki vrlo važno, te u ovom slučaju drugu rešetku u tetrodi nazivamo zaslonskom rešetkom. U *pojačalima za niske frekvencije* zaštitno djelovanje ove rešetke ne dolazi toliko do

izražaja. U ovom slučaju je njezin zadatak da spriječi povratno djelovanje anode, pa se zato zove *zaštitna* rešetka.

276. Snimimo li U_a — I_a-karakteristiku tetrode na drugoj rešetki, dobivamo krivulju kao *a* na sl. 208. Vidimo da anodna struja raste s anodnim naponom dotle, dok je anodni napon U_a z n a t n o m a n j i od napona druge rešetke U_{g2}. Isto vrijedi i onda, kad je anodni napon v e ć i od napona na drugoj rešetki. Međutim u području, u kojem je anodni napon približno jednak naponu druge rešetke, *anodna struja opada s po-*

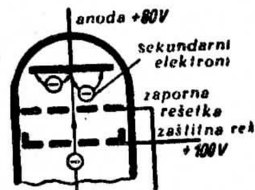


Sl. 208.



Sl. 209.

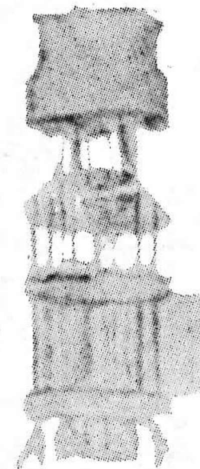
rastom anodnog napona („negativna karakteristika")! Ovu pojavu, koja je kod tetroda vrlo neugodna, može se rastumačiti na slijedeći način: Udaraju li elektroni, koji se gibiju velikom brzinom, o metalnu ploču (kao što je anoda), tada će oni iz metala izbijati nove, takozvane s e k u n d a r n e e l e k t r o n e (sl. 209., na kojoj su elektroni nacrtani pretjerano veliki). Ovi elektroni će se gibati prema elektrodi, koja ima najviši pozitivni napon. Tu je po prilici ista pojava, kao i kod taneta, koje udari o kameni zid, pa odajući svoju kinetičku energiju izbija iz zida komadiće kamenja. Dok je anodni napon v e ć i od napona na drugoj rešetki, vraćat će se sekundarni elektroni na anodu (sl. 209.-a), gibat će se dakle u smjeru prvobitne struje elektrona, pa će se anodna struja na taj način povećavati, a unutarnji otpor elektronke smanjivati. Ako je međutim anodni napon približno j e d n a k naponu na drugoj rešetki, ili čak m a n j i od njega, gibat će se sekundarni elektroni, koji su izbijeni iz druge rešetke, prema njoj samoj, isto kao i sekundarni elektroni anode (sl. 209.-b). Uslijed toga će anodna struja postajati manjom, a smanjivat će se čak i onda, kad anodni napon poraste.

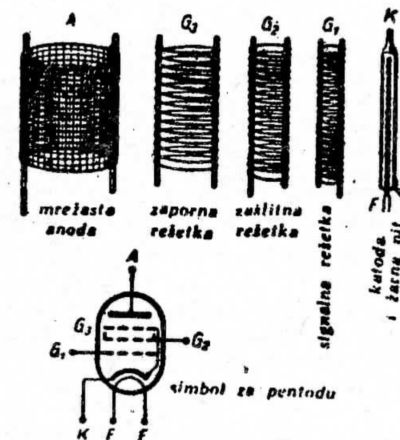


Sl. 210.

277. — Nepravilnost I_a —U_a-karakteristike, koju uzrokuju sekundarni elektroni, dade se ukloniti umetanjem rešetke između anode i druge rešetke, pa na taj način dobivamo p e n t o d u. Ova treća rešetka zove se z a p o r n a r e š e t k a. Ako se zaporna rešetka u samoj elektronki ili vani spoji s katodom ona sprečava sekundarne elektrone, da idu na drugu rešetku i vraća ih k anodi. Treća rešetka je nabijena negativno, pa se elektroni ne mogu gibati prema njoj (sl. 210.). Zahvaljujući tome ne dolazi do smanjenja anodne struje čak ni onda, kad anodni napon padne na vrijednost

nižu od vrijednosti napona na drugoj rešetki, te U_a —I_a-karakteristika, kako se vidi na sl. 208., nema koljena. Uvođenjem zaporne rešetke može se unutarnji otpor elektronke povećati na više od jednog megoma, a kapacitet anoda—uzbudna rešetka smanjiti na nekih 0,002 pF. Kako se istodobno smanjuje i prohvat (do 0,02%), mogu se ovakve elektronke vrlo dobro upotrebiti u pojačalima Na sl. 211. vidimo konačno unutarnju gradnju jedne indirektno žarene *pentode*, koja služi kao i z l a z n a elektronka u niskofrekventnom pojačalu Da bi se gradnja vidjela još jasnije, pokazane su pojedine elektrode također posebno (katoda K, žarna nit F, uzbudna rešetka G_1, zaštitna rešetka G_2, zaporna rešetka G_3 i anoda A). Na gornjem dijelu se vidi priključak, koji vodi do kapice na balonu, a spojen je s uzbudnom rešetkom. Također se vide krilca od tinjca, koja služe za centriranje i





Sl. 211.

osiguranje čitavog sistema od pomicanja u balonu. Zanimljivo je da je anoda izvedena u obliku mreže. To je zato, da se anoda ne bi suviše zagrijavala za vrijeme pogona (vidi odsjek 2.7.). Zaporna rešetka G_3 kod ove elektronke vezana je s katodom već u samoj elektronki, pa je prema tome izvana nepristupačna. Kod modernih pentoda, koje se upotrebljavaju u visokofrekventnim pojačalima (*visokofrekventne pentode)*, izvedena je zaporna rešetka na posebnu priključnicu nožišta.

Kako smo već napomenuli, u drugom dijelu bit će rad elektronki s više rešetki u prijemnicima i pojačalima rastumačen opširnije, a tada ćemo se osvrnuti i na ostale elektronke s više elektroda, kao i na čelične elektronke.

Ponavljanje

Ako drugu rešetku kod tetrode proširimo, možemo postići da uzbudna rešetka bude gotovo posve zaštićena od električkih silnica, koje dolaze s anode; na taj način se smanjuje vrijednost *kapaciteta anoda—uzbudna rešetka*. Ovako građena druga rešetka naziva se *zaštitnom rešetkom*. Kod anodnih napona, koji su približno jednaki naponima druge rešetke, imamo

na $U_a - I_a$-karakteristici tetrode koljeno. U tom području vrijednost anodne struje pada s porastom anodnog napona *(negativna karakteristika)* Ovu pojavu, koju uzrokuju *sekundarni elektroni* izbijeni iz anode, može se ukloniti umetanjem treće rešetke (*zaporna rešetka*) između anode i druge rešetke, pa od tetrode dobivamo *pentodu*. Ugradnjom ove rešetke smanjuje se ukupni prohvat, a isto tako i kapacitet anoda—uzbudna rešetka, dok se unutarnji otpor znatno povećava. Radi toga pentoda ima osobine, koje se mogu vrlo dobro iskoristiti u pojačalima.

Pitanja i odgovori

Pitanje: Zbog čega je djelovanje kapaciteta anoda—uzbudna rešetka štetno? *Odgovor:* Promjene izmjeničnog anodnog napona prenose se preko ovog kapaciteta djelomično na uzbudnu rešetku i ometaju pravilan rad elektronke. — *P.:* Kako se može smanjiti kapacitet anoda—uzbudna rešetka? *O.:* Tako da se rešetka električki oklopi prema anodi. — *P.:* Kako se ovo oklapanje izvodi? *O.:* Tako da se uzme što gušća zaštitna rešetka, što veći razmak između anode i dovoda k uzbudnoj rešetki i da se elektronka izvana metalizira — *P.:* Što su sekundarni elektroni? *O.:* Elektroni, koji iskaču iz metalnih predmeta, kad u njih udare neki drugi elektroni — *P.:* Kakvo je djelovanje ovih elektrona u tetrodi? *O.:* Kad anodni napon ima vrijednost približno jednaku vrijednosti napona druge rešetke, pada anodna struja s porastom anodnog napona, te na $U_a - I_a$-karakteristici nastaje koljeno. — *P.:* Kako se ova pojava može otkloniti? *O.:* Tako da se između druge rešetke i anode umetne treća rešetka, koja se spaja s katodom. — *P.:* Kako se ovakve elektronke nazivaju? *O.:* Pentode ili elektronke sa zapornom rešetkom. — *P.:* Koje prednosti ima umetanje zaporne rešetke? *O.:* Ukupni prohvat i kapacitet anoda—uzbudna rešetka se smanjuje, a unutarnji otpor elektronke se povećava

Pitanja

103 Kakva je razlika između zaštitne rešetke i zaslonske rešetke?
104 Kako se objašnjava negativni dio karakteristike tetrode?
105 Što je visokofrekventna pentoda?

Zadaci

86. Kod pentode je u radnoj točki prohvat između anode i zaštitne rešetke 1%, a prohvat zaštitne rešetke prema uzbudnoj rešetki 4%. Koliki je: a) ukupni prohvat, b) napon pomaka, ako je napon zaštitne rešetke 100 V, a anodni napon 200 V?

87. Koliki je ukupni prohvat pentode, koja u radnoj točki ima strminu 2,1 mA/V, a unutarnji otpor 2 MΩ?

Odgovori na pitanja

1. — Izmjenična struja je sinusoidalna, ako je njezina momentalna vrijednost proporcionalna sinusu faznog kuta ($i = I_m \cdot sin\ \omega t$).

2. — Kružna frekvencija je jednaka 2π-kratniku frekvencije. Za tehničku izmjeničnu struju je $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 100\pi$.

3 — Momentalne vrijednosti označuju se malenim slovima, efektivne velikima, a tjemene velikim slovima s indeksom m (na pr u, U, U_m).

4. — Efektivna vrijednost napona jednaka je 0,707-kratniku tjemene vrijednosti.

5. — Zavojnica ima induktivitet 1 H, kad se u njoj inducira EMS 1 V ako se struja, koja kroz nju teče, jednoliko mijenja za 1 A u 1 s.

6. U momentu iskapčanja zbog induktivnog djelovanja zavojnice nastaju visoki naponi, koji uzrokuju iskru iskapčanja.

7. — Napon na priključnicima prethodi struji za četvrtinu periode, dakle za $\pi/2$ ili 90^0.

8. — Ne, napon na priključnicama i struja su „u fazi"

9 — Kružna frekvencija i induktivitet moraju biti što veći, a radni otpor što manji ($tg\ \varphi = \omega L/R$).

10, — Algebarsko zbrajanje se može primijeniti kod momentalnih vrijednosti, dok za efektivne, odnosno tjemene vrijednosti vrijedi geometrijsko zbrajanje (trokut).

11. — Prividni otpor je otpor zavojnice izmjeničnoj struji, kad ta zavojnica ima i radni otpor ($Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$), dok je induktivni otpor otpor izmjeničnoj struji zavojnice, koja nema radnog otpora ($X_L = \omega L$).

12. — Kut gubitka zavojnice možemo dobiti iz jednadžbe $tg\ \delta = 1/tg\varphi = R/\omega L$, a osim toga je $\delta = 90^0 - \varphi$.

13. — $\varphi = -\pi/2$ ili -90^0.

14. — U faradima [F], mikrofaradima [μF] i pikofaradima [pF]. Vrijedi odnos: 1 F = 10^6 μF = 10^{12} pF, 1 μF = 10^{-6} F, 1 pF = 10^{-12} F.

15. — Induktivni otpor direktno je proporcionalan kružnoj frekvenciji ($X_L = \omega L$), dok je kapacitivni otpor kružnoj frekvenciji obrnuto proporcionalan ($X_C = 1/\omega C$).

16. = Fazne prilike su baš obrnute. Kod induktiviteta napon na priključnicama *prethodi* struji za četvrtinu periode, dok kod kapaciteta napon na priključnicama *zaostaje* za strujom za četvrtinu periode.

17. — Zato jer napon na priključnicama *zaostaje* za strujom.

18. — Tempa, diakond, kvarc, ultra-kalan, trolitul, tinjac, kerafar, kalan, kalit, kondenza, frekventa.

19. — Gubitke uslijed skin-efekta, vrtložnih struja, loše izolacije, isijavanja, premagnetiziranja, uslijed kapaciteta među zavojima i dielektričke gubitke u dijelovima od izolacionog materijala.

20. — Visokofrekventna željezna jezgra se sastoji od vrlo finog željeznog praha, dok se obične željezne jezgre, koje se upotrebljavaju kod niskih frekvencija, sastoje od međusobno izoliranih željeznih limova. Permeabilitet visokofrekventne željezne jezgre je mnogo manji od permeabiliteta obične jezgre.

21. — Pomoću ove jednadžbe možemo približno izračunati induktivitet b i l o k a k v e zavojnice.

22. — O vrsti i debljini dielektrikuma.

23. — Kod elektrolitskih kondenzatora je otpor izolacije daleko manji od otpora ostalih vrsta kondenzatora, jer je njihov dielektrikum mnogo lošiji.

24. — Ne, jer bi u tom slučaju oksidni sloj elektrolitskog kondenzatora bio uništen.

25. — Ne! Iako ne dolazi do davanja energije prema van, energija se njiše izmjenično između generatora i potrošača.

26. — Iz odsjeka 74. slijedi, da je $cos\,\varphi =$ radna snaga: prividna snaga.

27. — Radna snaga se mjeri u vatima [W], prividna u voltamperima [VA], a prazna u praznim vatima [pW].

28. — Algebarsko zbrajanje vrijedi za momentalne vrijednosti, a geometrijsko za efektivne i tjemene vrijednosti.

29. — Iz vektorskog prikaza, odnosno trokuta otpora (vidi sl. 65. i 66.).

30. — U jedinicama praktičko-elektrotehničkog sistema mjera, dakle U u [V], Z, X, R u [Ω], L u [H], C u [F], ω u [1/s].

31. Jednaka je pozitivnoj diferenciji vodljivosti kapaciteta i induktiviteta, dakle $Y = 1/X = |\ [(1/\omega\ ) - \omega C]\ |$

32. — Thomsonova jednadžba omogućuje izračunavanje rezonantne frekvencije električkih titrajnih krugova.

33. – Ugađanje serijskog spoja na „serijsku rezonanciju" mijenjanjem induktiviteta ili kapaciteta.

34. — Kod serijske rezonancije je prazni otpor jednak nuli, a kod paralelne je naprotiv beskonačno velik (u slučaju, kad u krugu nema radnog otpora).

35. — Prema jednadžbi (55) je $\rho = \omega_0 L/R$, a prema jednadžbi (22) $tg\,\delta = R/\omega L$. U slučaju rezonancije ($\omega = \omega_0$) je prema tome oštrina rezonancije jednaka recipročnoj vrijednosti tangensa kuta gubitaka.

36. — U slučaju paralelne rezonancije krug predstavlja beskonačno velik otpor, ako nema gubitaka, pa prema tome ne propušta struju.

37. — Prazni otpor rezonancije zapornog kruga bez gubitaka beskonačno je velik. Ako međutim krug ima gubitaka, onda je rezonantni otpor jednak $L/C \cdot R$.

38. — Jer zaporni krug ugođen na lokalnu stanicu predstavlja vrlo veliki otpor samo za frekvenciju, na koju je ugođen, a ne i za ostale frekvencije.

39. — Oštrina rezonancije je kod paralelne rezonancije jednaka recipročnoj vrijednosti oštrine rezonancije za serijsku rezonanciju, ako su vrijednosti L, R i C u oba slučaja jednake.

40. U oba slučaja se radi o pretvorbi energije. Kod električnih titrajnih krugova se električka energija pretvara u magnetsku, a kod njihala potencijalna u kinetičku.

41. — Otporom gubitaka titrajnog kruga.

42. — Neprigušeni titraji nastaju samo u titrajnim krugovima bez gubitaka. Prigušeni, odnosno aperiodski titraji nastaju u krugovima, kojima je otpor gubitaka manji, odnosno jednak ili veći od dvostrukog valnog otpora.

43 — Logaritmički dekrement prigušenja i širina pojasa.

44. — Širina pojasa jednaka je $b = f_2 - f_1 = 0{,}1592 \cdot (R/L)$. Tu su f_1 i f_2 u [Hz], R u [Ω], a L u [H].

45. — Podijeljeno iskrište omogućuje brže gašenje iskara, tako da se može postići mnogo veći niz iskara i veća energija, nego kod jednostavnog iskrišta.

46. — Jer se struje zbog visoke frekvencije šire samo po površini ljudskog tijela (skin-efekt).

47. — L-antena, Marconijeva antena, T-antena i dipol — antena (sl. 96.-b, 96.-e, 100., 101.-a).

48. — Povećavaju završni kapacitet, čime se postiže bolje isijavanje energije.

49. — Odgovor se vidi na sl. 103.

50. — U biti ne postoje nikakve razlike, jer se i u jednom i u drugom slučaju radi o elektromagnetskim valovima. Razlika je samo u duljini, jer su radiovalovi mnogo dulji od valova svjetla.

51. — Područje dugih valova između 1 000 i 2 000 m, srednjih između 200 i 600 m i kratkih valova između 10 i 50 m.

52. — Zato što struja i napon nisu u većini slučajeva jednolično podijeljeni po duljini antene. Iznimke su samo antene s velikim završnim kapacitetima, na primjer T-antena i L-antena.

53. — Duljina vala titraja antene, kad u anteni nema ni zavojnice ni kondenzatora.

54. — Otpor isijavanja je neovisan o veličini antene i uvijek je jednak 40 Ω.

55. — Jednak je sumi izgubljenog i isijanog učina.

56. — Ukoliko se radi o površinskim valovima, Austinova jednadžba vrijedi donekle točno do udaljenosti od kojih 2000 km. Za kratke valove, koji se šire kao prostorni valovi, mora se eksponencijalni član ispustiti, pa jednadžba obzirom na red veličine vrijedi i za vrlo velike udaljenosti.

57. — Antenama posebnog oblika i posebnim spojevima (feding-regulacija) u prijemnicima.

58. — Kratkim valovima upotrebljavajući pri tome različite duljine valova.

59. — Uslijed ugađanja izmjenični napon u prijemniku postaje djelovanjem rezonancije mnogo viši, a osim toga na taj način mogu se odijeliti pojedini odašiljači, koje se želi primati.

60. — Zato, što svaka antena pobuđena na titranje isijava energiju, a uslijed toga prijemnik dobiva samo dio one energije, koju je antena primila.

61. — Treba paziti na propise za antene, a naročito je važno da svaka antena bude osigurana zaštitom od groma i prenapona.

62. — Zaštita se mora izvesti grubim iskrištem, finim iskrištem i preklopcem za uzemljenje spojenim s dobrim uzemljenjem.

63. — Protuteg je naprava od žice postavljena izolirano pod antenom, a često služi kao zamjena za uzemljenje.

64. — Električkim i magnetskim indukcionim djelovanjem elektromagnetskog izmjeničnog polja.

65. — Izmjenični napon induciran u okvirnoj anteni proporcionalan je jakosti magnetskog, odnosno električnog polja, broju zavoja i površini presjeka okvirne antene, a obrnuto je proporcionalan duljini vala, koji se želi primiti.

66. — Istodobnom upotrebom obiju vrsta antena može se izvršiti jednoznačno određivanje smjera.

67. — Utoliko, što se djelovanje negativnih poluperioda ne može posve potisnuti.

68. — Od metalnih oksida ili sulfida.

69. — Bežičnom prijenosu glazbe i govora.

70. — Ako je prijenosna frekvencija f (kHz), najniža niska frekvencija f_n (kHz), a najviša f_h (kHz), isijavat će odašiljač osim frekvencije f još i bočne frekvencije od $f + f_n$ do $f + f_h$ i od $f - f_n$ do $f - f_h$ (sl. 140).

71. — Da je amplituda niskofrekventnih titraja 60% amplitude visokofrekventnih nosećih titraja.

72. — Može, ali samo kod malenih izmjeničnih napona i niskog stupnja modulacije, jer inače dolazi do izobličenja uslijed zakrivljenosti karakteristike kristala.

73. — Tako, da se u antenski krug uvrsti promjenljivi induktivitet ili zavojnica s odvojcima (sl. 146.-a).

74. Uslijed rezonancije moguć je dobar prijem frekvencija iz područja u blizini rezonantne frekvencije antene.

75. — Zato, što su amplitude izmjeničnog napona lokalne stanice mnogo veće od amplituda napona udaljenih stanica.

76. — Da je primljeni izmjenični napon odašiljača, koji želimo primati, 600 puta veći od primljenog napona odašiljača udaljenog za 9 kHz.

77. — Zaporni krug u slučaju rezonancije predstavlja vrlo velik otpor, a usisni krug vrlo malen otpor.

78. — Induktivitet je proporcionalan kvadratu broja zavoja pojedine zavojnice, a međusobni induktivitet produktu broja zavoja obiju zavojnica.

79. — Ako su obje zavojnice motane u istom smjeru, tada je ukupni induktivitet kod savršeno čvrste veze $k = 1$ najveći i to: $L = L_1 + L_2 + 2\sqrt{L_1 \cdot L_2}$.

80. — Odgovor je prikazan slikom 160.

81. — Zato, što jedan titrajni krug djeluje na drugi, pa uslijed toga u oba titrajna kruga dolazi do treptaja, koji se dadu rastaviti u dva pojedinačna titranja.

82. — I jedan i drugi titrajni krug pojasnog filtra moraju se pojedinačno promjenljivim kondenzatorom ugoditi na željenu frekvenciju.

83. — Odgovor se vidi na sl. 165. desno.

84. — Oklapanje ima svrhu da spriječi djelovanje magnetskih, odnosno električkih silnica na ostale dijelove u prijemniku, pa da na taj način otkloni uzroke smetnji.

85. — Zato, što su duljine valova u d o n j e m području kuta zakreta zbijene.

86 — Ne, duljine valova su u g o r n j e m području kuta zakreta zbijene jače nego u donjem.

87. — Pomoću trimera i sektora na rotorskom paketu.

88 — Negativno tinjavo svijetlo nastaje uslijed ionizirajućeg djelovanja pozitivnih iona plina u blizini katode, a pozitivno ionizirajućim djelovanjem elektrona, koji se giblju prema anodi.

89. — Kod visoke temperature se atomi i slobodni elektroni žestoko giblju, radi čega iz užarenog metala elektroni iskaču.

90. — Da, jer se pomoću užarene katode može čak i u z r a k o p r a z n o m prostoru stvoriti struja elektrona.

91. — Od p o č e t n e s t r u j e kod niskih negativnih napona na anodi, zatim od s t r u j e p r o s t o r n o g n a b o j a kod pozitivnih napona na anodi, koji nisu suviše visoki, i od s t r u j e z a s i ć e n j a kod anodnog napona, koji je dovoljno visok.

92. — Struja prostornog naboja može se izračunati pomoću Langmuirove jednadžbe (jednadžba 86), a struja zasićenja pomoću Richardsonove jednadžbe (jednadžba 85).

93. — Kod više temperature izaći će više elektrona, ali će uslijed toga i prostorni naboj biti veći, pa struja prostornog naboja kod istog anodnog napona ne će biti veća.

94. — Dovoljno velikim negativnim nabojem uzbudne rešetke.

95. — Indirektno žarena katoda s bifilarno motanom žarnom niti.

96. — Kod ovih katoda nema cjevčice od izolatora između žarne niti i cjevčice od nikla, koja nosi aktivnu masu, jer je žarna nit direktno zamočena u izolirajuću masu.

97 — Materijal (na primjer magnezij ili barij), koji služi za poboljšanje odnosno održavanje dobrog vakuuma u balonu elektronke.

98. — Povećanjem anodnog napona pomiče se krivulja $U_a - I_a$ na lijevo, dakle u smjeru negativnih napona na rešetki.

99. — Struja rešetke se pojavljuje već onda, kad rešetka ima malen negativni napon, i naglo se povećava kad se povećava pozitivni napon rešetke.

100. — P r o h v a t = promjena napona na rešetki : promjena anodnog napona kod iste anodne struje, s t r m i n a = promjena anodne struje : promjena napona na rešetki uz isti anodni napon, u n u t a r n j i o t p o r = promjena anodnog napona : promjena anodne struje uz isti napon na rešetki.

101. — Zato, što karakteristike nisu pravci, nego imaju manja ili veća zakrivljenja, a osim toga ni međusobni razmak tih krivulja nije svagdje jednako velik.

102. — U radnoj točki postavi se tangenta na U_a —I_a-karakteristiku. Tangens kuta, što ga tangenta zatvara s I_a-osi, jednak je unutarnjem otporu (vidi sl. 203.).

103. — Zaslonska rešetka je povećana zaštitna rešetka, a djelovanje jedne i druge u biti je jednako (smanjenje povratnog djelovanja anode i ukupnog prohvata, te povećanje strmine), samo što zaslonska rešetka znatno smanjuje kapacitet anoda—uzbudna rešetka.

104. — Ako je anodni napon približno jednak naponu zaslonske rešetke ili je manji, dolazi do s m a n j e n j a anodne struje uslijed sekundarnih elektrona izbijenih iz anode, pa u ovom području napona anodna struja pada s porastom anodnog napona.

105. — Pentoda ima osim uzbudne rešetke još i zaslonsku i zapornu rešetku (ova posljednja služi za suzbijanje djelovanja sekundarnih elektrona).

Rješenje zadataka

1. — Zadano je $f = 191$ kHz — 191 000 Hz: traži se T i ω. Iz jednadžbe (6) imamo: $T = 1/f = 1/191\,000 = 0{,}0000052$ s $=$ $5{,}2 \cdot 10^{-6}$ s. Iz jednadžbe (7) dobivamo: $\omega = 2\pi \cdot 191\,000 =$ 1 200 000 [1/s].

2. — Zadano je $I = 5$ A; traži se I_m. Iz jednadžbe (9) imamo: $I_m = I \cdot \sqrt{2} = 5 \cdot 1{,}414 =$ 7,07 A.

3. — Zadano je $f = 50$ Hz, $U = 220$ V, $\Phi_m = 220000$ M; traži se w. Iz jednadžbe (11) imamo: $w = U \cdot 10^8/4{,}44 \cdot f \cdot \Phi_m = 220 \cdot 10^8/4{,}44 \cdot 50 \cdot 220000 =$ 450 zavoja,

4. — Zadano je $R = 10$ kΩ $= 10000$ Ω; $I = 2$ mA $= 0{,}002$ A; traži se U i U_m. Iz Ohmovog zakona imamo: $U = I \cdot R = 0{,}002 \cdot 10\,000 =$ 20 V. Dalje je prema jednadžbi (8): $U_m = U \cdot \sqrt{2} = 20 \cdot 1{,}414 =$ 28,3 V.

5. — Zadano je $\mu = 1$, $l = 40$ mm $= 4$ cm, $w = 50$ zavoja, $L = 0{,}1$ mH $= 0{,}0001$ H $= 10^{-4}$ H; traži se d. Iz jednadžbe (15) imamo najprije za površinu presjeka: $F = L \cdot l \cdot 10^8/\mu \cdot \Pi \cdot w^2 = 10^{-4} \cdot 4 \cdot 10^8/1 \cdot 1{,}256 \cdot 2500 = 10000/785 = 12{,}7$ cm². Iz $F = d^2 \cdot \pi/4$ dobivamo: $d = 2 \cdot \sqrt{F/\pi} = 2 \cdot \sqrt{4{,}04} = 4{,}02$ cm $=$ 40,2 mm.

6. — Zadano je $R = 100$ Ω, $T = 0{,}1$ s; traži se L. Prema odsjeku 12. je $T = L/R$, dakle $L = R \cdot T = 100 \cdot 0{,}1 =$ 10 H.

7. — Zadano je $L = 5$ H, $f = 1000$ Hz, $\omega\ 2\pi f = 2000\pi$, $Z = 50$ kΩ $= 50\,000$ Ω; traži se R. Iz jednadžbe (20) imamo kvadriranjem: $R^2 = Z^2 - (\omega L)^2 = 50000^2 - (10\,000\pi)^2 = 25 \cdot 10^9 - 9{,}87 \cdot 10^8 = 15{,}13 \cdot 10^9$, to jest $R = 3{,}89 \cdot 10^4$ Ω $=$ 38,9 kΩ. Prividni otpor Z n i j e dakle jednak sumi obaju otpora (38,9 + 31,4 = 70,3 kΩ) !

8. — Zadano je $R = 2$ kΩ $= 2000$ Ω, $f = 50$ Hz, $\omega = 2\pi f = 100\pi$, $U = 50$ V, $I = 10$ mA $= 0{,}01$ A; traži se Z, L φ i δ Prema Ohmovom zakonu (jednadžba 21.) imamo: $Z = U/I = 50/0{,}01 = 5000$ Ω $=$ 5 kΩ. Dalje slijedi iz jednadžbe (20): $(\omega L)^2 = Z^2 - R^2$; $(100\pi \cdot L)^2 = 25 \cdot 10^6 - 4 \cdot 10^6 = 21 \cdot 10^6$, dakle $100\pi \cdot L = 4{,}58 \cdot 10^3$ ili $L - 45{,}8/\pi =$ 14,6 H. Fazni kut dobivamo iz jednadžbe (18): $tg\,\varphi = 100\pi \cdot 14{,}6/2000 = 4580/2000 = 2{,}290$, a odavde $\varphi = 66^0\,24'$. Kut gubitaka dobivamo prema odsjeku 25.: $\delta = 90^0 - 66^0\,24' = 23^0\,36'$.

9. — Zadano je $R = 50$ Ω, $L = 60$ µH $= 60 \cdot 10^{-6}$ H, $U_L = 5$ mV $= 0{,}005$ V, $\omega = 10^6$; traži se U i U_R. Napon na priključnicama dobivamo iz Ohmovog zakona (jednadžba 21) $U = I \cdot \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ Ovdje nam međutim nedostaje jakost struje I. Budući da je jakost struje I svagdje jednako

skim spajanjem induktiviteta snizila se je vlastita frekvencija antene na 841 kHz, a vlastita duljina vala u odgovarajućem omjeru povećala („produživanje“ antene!)

43. — Rješenje ovog zadatka vidimo na slikama 99., 100. i 101.-a.

44. — Zadano je $f = 1133$ kHz; traži se λ. Iz jednadžbe (66) imamo: $\lambda = 3 \cdot 10^5/1133 = \underline{264{,}7 \text{ m}}$.

45. — Zadano je $\lambda = 7$ m; traži se f. Iz jednadžbe (66) slijedi: $f = 3 \cdot 10^5/7 \approx 43\,000 \text{ kHz} = \underline{43 \text{ MHz}}$.

46. — Zadano je $L = 0{,}16 \text{ mH} = 1{,}6 \cdot 10^{-4}$ H, $C = 250 \text{ pF} = 2{,}5 \cdot 10^{-10}$ F; traži se λ. Ako Thomsonovu jednadžbu (54) uvrstimo u jednadžbu (65) dobivamo: $\lambda = 3 \cdot 10^8 \cdot 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C} = 6\pi \cdot 10^8 \cdot \sqrt{1{,}6 \cdot 10^{-4} \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-10}} = 6\pi \cdot 10^8 \cdot \sqrt{4 \cdot 10^{-14}} = 120\pi = 377$ m.

47. — Zadano je $l_a = 150$ m, $h = 50$ m; traži se λ_a. Iz odsjeka 149. dobivamo za *T-antenu:* $l_i = h + (l_a/2) = 125$ m, a za *L-antenu:* $l_i = h + l_a = 200$ m. Kao prosječna vrijednost bit će dakle za *T-antenu:* $\lambda \approx 6\, l_i = \underline{750 \text{ m}}$, a za *L-antenu:* $\lambda_a \approx 4{,}3 \cdot l_i = \underline{860 \text{ m}}$.

48. — Zadano je $h_w = 20$ m, $N_s = 200$ W, $\lambda = 400$ m; traži se I_0. Ako iz jednadžbe (67) izvučemo I_0^2 dobivamo: $I_0^2 = (N_s/1579) \cdot (\lambda/h_w)^2 = 200 \cdot 400/1579 = 50{,}66$, dakle $\underline{I_0 = 7{,}12 \text{ A}}$

49. — Zadano je $h_w = 44$ m, $\lambda = 440$ m, $R_a = 25\ \Omega$, $I_0 = 10$ A; Traži se R_s, N_s, N_a, i η_a. Iz jednadžbe (68) imamo: $R_s = 1579 \cdot (44/440)^2 = \underline{15{,}79\ \Omega}$. Time dobivamo iz jednadžbe (67): $N_s = 15{,}79 \cdot 100 = 1579 \text{ W} \approx \underline{1{,}58 \text{ kW}}$. Dalje prema odsjeku 153.: $N_a = I_0^2 \cdot R_a = 100 \cdot 25 = 2500 \text{ W} = \underline{2{,}50 \text{ kW}}$. Konačno iz jednadžbe (69): $\eta_a = 15{,}79/25 = 0{,}632 = 63{,}2\,\%$.

50. — Zadano je $\lambda = 400$ m, $h_w = 50$ m, $I_0 = 60$ A, $r = 100 \text{ km} = 100\,000$ m, $w = 0{,}00035$; traži se $\mathfrak{E}$, Iz jedn. (70) imamo:

$$\mathfrak{E} = 120\pi \frac{50 \cdot 60}{400 \cdot 100\,000} \cdot e^{-\frac{0{,}00035 \cdot 100\,000}{\sqrt{400}}} = 0{,}009\pi \cdot 2{,}718^{-\frac{35}{20}} = \frac{0{,}02827}{2{,}718^{1{,}75}}$$

Ovaj razlomak izračunat ćemo pomoću logaritama:

$$\begin{aligned} \log 0{,}02827 &= 0{,}4513-2 \\ \log 2{,}718 &= 0{,}4343 \\ 1{,}75 \cdot \log 2{,}718 &= 0{,}760 \\ \hline \log \mathfrak{E} &= 0{,}6913-3, \end{aligned}$$

dakle: $\mathfrak{E} = 0{,}0049 \text{ V/m} = \underline{4{,}9 \text{ mV/m}}$.

51. — Zadano je $\lambda = 40$ m, $h_w = 10$ m, $r = 10000 \text{ km} = 10^7$ m, $\mathfrak{E} = 5\ \mu\text{V/m} = 5 \cdot 10^{-6}$ V/m; traži se I_0. Kako se radi o kratkim valovima, ispustit ćemo u Austinovoj formuli eksponencijalni član, pa onda iz jednadžbe (70) izvući I_0: $I_0 = \mathfrak{E} \cdot \lambda \cdot r/120\pi \cdot h_w = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 40 \cdot 10^7/120\pi \cdot 10 = 5/3\pi = \underline{0{,}53 \text{ A}}$. Iz ovoga vidimo, kako je malena struja potrebna u strujnom trbuhu odašiljačke antene, da bi se kod kratkih valova moglo premostiti ovako velike udaljenosti.

52. — Zadano je $h_w = 5$ m, $U = 75\ \mu$V; traži se $\mathfrak{E}$. Iz jednadžbe (71) imamo: $\mathfrak{E} = U/h_w = 75/5 = \underline{15\ \mu\text{V/m}}$.

19. — Zadano je $n = 29$, $d = 0{,}5 \text{ mm} = 0{,}05$ cm, $C = 550$ pF, $\varepsilon = 1$; traži se F. Promijenivši jednadžbu (33) dobivamo: $F = C \cdot d/(n-1) \cdot \varepsilon = 550 \cdot 0{,}05/0{,}08859 \cdot 28 \cdot 1 = \underline{11{,}09 \text{ cm}^2}$.

20. — Zadano je $F = 375 \text{ mm}^2 = 3{,}75 \text{ cm}^2$, $d = 0{,}1 \text{ mm} = 0{,}01$ cm, $\varepsilon = 7$, $C = 2\,000$ pF; traži se n. Razmještanjem jednadžbe (33) dobivamo: $n - 1 = C \cdot d/0{,}08859 \cdot \varepsilon \cdot F = 2000 \cdot 0{,}01/0{,}08859 \cdot 7 \cdot 3{,}75 = 8{,}60$, a $n = 8{,}60 + 1 = 9{,}60$, to jest $\underline{\approx 10 \text{ ploča}}$.

21. — Imamo slijedeće mogućnosti: a) paralelno spajanje dvaju kondenzatora: $C_1 = C + C = 2C = \underline{2000 \text{ pF}}$; b) serijski spoj: $C_2 = C \cdot C/(C + C) = C/2 = \underline{500 \text{ pF}}$; c) paralelni spoj svih triju kondenzatora: $C_3 = C + C + C = 3C = \underline{3000 \text{ pF}}$; d) serijski spoj svih triju kondenzatora: $1/C_4 = (1/C) + (1/C) + (1/C) = 3/C$, dakle $C_4 = C/3 = \underline{333{,}3 \text{ pF}}$; e) serijski spoj dvaju kondenzatora s trećim paralelno spojenim: serijski spoj prvih dvaju daje $C' = 500$ pF, a dodavanjem trećega paralelno dobivamo $C_5 = C' + C = 500 + 1\,000 = \underline{1\,500 \text{ pF}}$; *f*) paralelni spoj dvaju kondenzatora s trećim spojenim u seriju: paralelni spoj prvih dvaju daje $C'' = 2\,000$ pF, serijskim dodavanjem trećega dobivamo: $C_6 = C'' \cdot C/(C'' + C) = 2000 \cdot 1\,000/(2\,000 + 1\,000) = 2\,000/3\,000 = \underline{666{,}7 \text{ pF}}$.

22. — Zadano je $C = 0{,}1\ \mu\text{F} = 10^{-7}$ F, $U = 220$ V, $\omega = 2\pi f = 100\pi$; traži se N, N_s i N_p. Da izračunamo učine moramo poznavati jakost struje I, a nju dobivamo iz jednadžbe (24): $I = U \cdot \omega C = 220 \cdot 100\pi \cdot 10^{-7} = 0{,}0069$ A. Kako je kod kapacitivnog opterećenja $\varphi = -90°$, dakle $\cos \varphi = 0$, bit će *radni učinak* $\underline{= 0}$, *Prividni učin* dobivamo iz odsjeka 74: $N_s = U \cdot I = 220 \cdot 0{,}0069 = \underline{1{,}52 \text{ VA}}$. *Prazni učin* podudara se prema jednadžbi (36) s prividnim učinom, jer je struja prazna: $N_p = N_s = 1{,}52$ pW.

23. — $100\,000 \text{ Ws} = 100\,000/1\,000 \cdot 36000 \text{ kWh} = \underline{0{,}0278 \text{ kWh}}$.

24. — Zadano je $I = 0{,}22$ A, $U = 220$ V, $\cos \varphi = 0{,}9$, $t = 10$ h, cijena $= 7$ Din/kWh; traži se N i iznos računa. Ovdje imamo radni učin, pa ćemo upotrebiti jednadžbu (39): $N = 220 \cdot 0{,}22 \cdot 0{,}9 = \underline{43{,}6 \text{ W}}$. 10-satni pogon stajat će prema tome (jer je $43{,}6 \text{ W} = 0{,}0436$ kW): $\underline{0{,}0436 \cdot 10 \cdot 7 = 3{,}052 \text{ dinara}}$.

25. — Zadano je $C = 3000 \text{ pF} = 3 \cdot 10^{-9}$ F, $L = 5$ H, $Z = 30 \text{ k}\Omega = 3 \cdot 10^4\ \Omega$, $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 10^3$; traži se R. Kvadriranjem i uređivanjem jednadžbe (45) dobivamo: $R^2 = Z^2 - [\omega L - (1/\omega C)]^2 = 9 \cdot 10^8 - [10^4\pi - (1/6\pi \cdot 10^3 \cdot 10^{-9})]^2 = 9 \cdot 10^8 - [10^4\pi - (10^6/6\pi)]^2 = 9 \cdot 10^8 - (-2{,}17 \cdot 10^4)^2 = 9 \cdot 10^8 - 4{,}71 \cdot 10^8 = 4{,}29 \cdot 10^8$, dakle $R = 2{,}07 \cdot 10^4\ \Omega = \underline{20{,}7 \text{ k}\Omega}$.

26 — Zadano je $L = 1 \text{ mH} = 10^{-3}$ H, $C = 500 \text{ pF} = 5 \cdot 10^{-10}$ F, $R = 100\ \Omega$, $\omega = 2\pi f = 10^6\pi$; traži se φ i $tg\ \delta$. Iz jednadžbe (47) dobivamo $tg\ \varphi = [10^6\pi \cdot 10^{-3} - (1/10^6\pi \cdot 10^{-10})]/100 = [10^3\pi - (10^4/5\pi)]/100 = (3141{,}6 - 636{,}6)/100 = 25{,}050$, dakle: $\underline{\varphi = 87°\,43'}$, Za kut gubitaka dobivamo iz jednadžbe (22): $tg\ \delta = 1/tg\ \varphi = \underline{1/25{,}05 = 0{,}040}$.

27. — Zadano je $\omega = 2\pi f = 100\pi$, $R = 50\ \Omega$, $\varphi = -45°$; traži se X. Uređivanjem jednadžbe (47) dobivamo: $X = R \cdot tg\ \varphi = 50 \cdot tg\,(-45°) = \underline{-50\,\Omega}$. Otpor, koji moramo ukopčati, mora dakle zbog negativnog predznaka uz X biti *kapacitivan*. Prema tome će biti dovoljno ukopčati kondenzator.

velika, mora prema Ohmovom zakonu biti: $I = U_L/\omega L = 0{,}005/10^6 \cdot 60 \cdot 10^{-6} = 0{,}00/60 = 0{,}0000833$ A. Onda je: $U = 0{,}0000833 \cdot \sqrt{50^2 + 60^2} = 0{,}0000833 \cdot \sqrt{6100} = 0{,}00651$ V $= 6{,}51$ mV. Za napon na radnom otporu imamo: $U_R = I \cdot R = 0{,}0000833 \cdot 50 = 0{,}004165$ V $= 4{,}17$ mV. Pokus prema jednadžbi (19), odnosno sl. 18., daje: $U^2 = U_R^2 + U_L^2 = 4{,}17^2 + 5^2 = 42{,}39$; $U = 6{,}51$ mV, kao što smo i prije izračunali.

10. — Zadano je $C = 1\ \mu F = 10^{-6}$ F, $f = 50$ Hz odnosno 1 kHz $= 10^3$ Hz, i 1 MHz $= 10^6$ Hz; traži se X_C. Iz jednadžbe (23) imamo: $X_C = 1/10^2 \cdot \pi \cdot 10^{-6}$, odnosno $1/2 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot 10^{-6}$, odnosno $1/2 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot 10^{-6}$, dakle $X_C = 10000/\pi$, odnosno $1000/2\pi$, odnosno $1/2\pi$. Prema tome je $X_C = 3183\,\Omega$, odnosno $159{,}1\ \Omega$, odnosno $0{,}159\ \Omega$.

11. — Zadano je $C = 10000$ pF $= 10^{-8}$ F, $U = 220$ V, $f = 50$ Hz; traži se I. Prema Ohmovom zakonu (jednadžba 24.) imamo: $I = U \cdot \omega C = 220 \cdot 100\pi \cdot 10^{-8} = 2{,}2\pi \cdot 10^{-4} = 0{,}00069$ A $= 0{,}69$ mA.

12. — Zadano je $f = 150$ kHz $= 1{,}5 \cdot 10^5$ Hz, $X_C = 1$ k$\Omega = 10^3\ \Omega$; traži se C. Iz jednadžbe (23) imamo: $C = 1/\omega \cdot X_C = 1/3\pi \cdot 10^5 \cdot 10^3 = 10^{-8}/3\pi$ F $= 10^4/3\pi$ pF $= 1061$ pF.

13. — Zadano je $R = 800\ \Omega$, $C = 2\ \mu F = 2 \cdot 10^{-6}$ F, $U = 220$ V, $f = 50$ Hz; traži se Z, I, U_R, U_C i φ. Iz jednadžbe (27) imamo: $Z = \sqrt{800^2 + (1/100\pi \cdot 2 \cdot 10^{-6})^2} = \sqrt{64 \cdot 10^4 + (10^8/4\pi^2)} = \sqrt{64 \cdot 10^4 + 253 \cdot 10^4} = \sqrt{317 \cdot 10^4} = 1780\ \Omega = 1{,}78$ kΩ. Prema Ohmovom zakonu (jednadžba 28) imamo: $I = U/Z = 220/1780 = 0{,}124$ A. Tada je $U_R = I \cdot R = 0{,}124 \cdot 800 = 99{,}2$ V. Dalje je: $U_C = I \cdot X_C = I/\omega C = 0{,}124 \cdot 1591 = 197{,}3$ V. Konačno iz jednadžbe (25) imamo: $tg\,\varphi = -1591/800 = -1{,}989$, dakle: $\varphi = -63\ 18'$

14. — Zadano je $U = 25$ V, $U_R = 12$ V; traži se U_C. Iz jednadžbe (26) imamo: $U_C^2 = U^2 - U_R^2 = 625 - 144 = 481$, dakle $U_C = 21{,}9$ V.

15. — Zadano je $C = 10000$ pF $= 10^{-8}$ F, $R = 2$ k$\Omega = 2 \cdot 10^3\ \Omega$, $Z = 4$ k$\Omega = 4 \cdot 10^3\ \Omega$; traži se f. Kvadriranjem i razmještanjem jednadžbe (27) dobivamo: $\omega^2 = 1/C^2 \cdot (Z^2 - R^2) = 1/10^{-16} \cdot 12 \cdot 10^6 = 10^{10}/12$, pa je prema tome $\omega = 10^5/3{,}46 = 28900$ [1/s]. Odavle slijedi: $f = \omega/2\pi = 28900/6{,}28 \approx 4600$ Hz $= 4{,}60$ kHz.

16. — Zadano je $r = 20$ mm $= 2$ cm, $w = 300$ zavoja, $L = 0{,}1$ mH $= 10^{-4}$ H; trazi se F. Iz jednadžbe (31) dobivamo: $F = L \cdot r/2w^2 \cdot 10^{-} = 10/9 = 1{,}11$ cm².

17. — Zadano je $U = 60$ mm $= 6$ cm, $d = 40$ mm $= 4$ cm, $L = 200\ \mu H = 2 \cdot 10^{-4}$ H; trazi se w. Upotrebit ćemo *Korndörferovu* jednadžbu (jednadžba 32). Kako je $d/U = 4/6 = 0{,}667$, dakle između 0 i 1, bit će prema odsjeku 53.: $k = \sqrt{d/U} = \sqrt[4]{0{,}667} = 0{,}904$. Iz jedn. (32) slijedi tada: $w^2 = L/10{,}5 \cdot d \cdot k \cdot 10^{-9} = 2 \cdot 10^{-4}/10{,}5 \cdot 4 \cdot 0{,}904 \cdot 10^{-9} = 5269$, dakle: $w \approx 73$ zavoja

18. — Zadano je $L_1 = 20$ mH $= 0{,}02$ H, $L_2 = 0{,}01$ H; traži se L. Kod *paralelnog* spajanja je prema odsjeku 56.: $1/L = (1/0{,}02) + (1/0{,}01) = 3/0{,}02$, dakle: $L = 0{,}0067$ H $= 6{,}7$ mH. Za serijski spoj imamo prema odsjeku 55, $L = 0{,}02 + 0{,}01 = 0{,}03$ H $= 30$ mH.

36. — Zedano je $L = 0{,}1$ mH $= 10^{-4}$ H, $C = 200$ pF $= 2 \cdot 10^{-10}$ F, $U_L = U_C = 0{,}5$ V; traži se f_0, Z_0 i I. Iz jednadžbe (54) slijedi: $f_0 = 1/2\pi\sqrt{10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-10}} = 10^7/2\pi\sqrt{2} = 1125000$ Hz $= 1{,}125$ MHz. Za valni otpor Z_0 dobivamo iz odsjeka 118. $Z_0 = \sqrt{L/C} = \sqrt{10^{-4}/2 \cdot 10^{-10}} = 1000/\sqrt{2} = 707\ \Omega$. Najveća efektivna jakost struje koja teče kroz L ili C, bit će prema jednadžbi (61): $I = U/Z_0 = 0{,}5/707 = 0{,}00071$ A $= 0{,}71$ mA.

37. — Zadano je $L = 25$ H, $C = 40000$ pF $= 4 \cdot 10^{-8}$ F; traži se f_0 i R. Iz jednadžbe (54) slijedi: $f_0 = 1/2\pi \cdot \sqrt{25 \cdot 4 \cdot 10^{-8}} = 1/2\pi \cdot \sqrt{10^{-6}} = 1000/2\pi = 159{,}2$ Hz Za 10% smanjena frekvencija iznosi dakle: $f'_0 = 159{,}2 + 15{,}9 = 143{,}3$ Hz. Iz proširene Thomsonove jednadžbe u odsjeku 120. slijedi uz $\omega'_0 = 2\pi f'_0$ nakon kvadriranja: $4\pi^2 \cdot f'^2_0 = (1/L \cdot C) - (R^2/4L^2)$, a odavle: $R^2 = [(1/L \cdot C) - 4\pi^2 \cdot f'^2_0] \cdot 4L^2 = [(1/25 \cdot 4 \cdot 10^{-8}) - 39{,}48 \cdot 20535] \cdot 2500 = 190000 \cdot 2500$, dakle: $R = 21800\ \Omega = 21{,}8$ kΩ. Vidimo dakle da će i ovako veliki otpor „razgoditi" titrajni krug samo za 10%.

38. — Zadano je $L = 10$ H, $C = 1000$ pF $= 10^{-9}$ F; traži se R. Ako je potrebno da nastane aperiodsko titranje, mora prema odsjeku 120. biti: $R \geqq 2 \cdot \sqrt{L/C} = 2 \cdot \sqrt{10/10^{-9}} = 2\sqrt{10^{10}} = 2 \cdot 10^5\ \Omega = 200$ kΩ. Mogli bismo dakle u seriju sa zavojnicom ukopčati radni otpor, koji bi bio jednak 200 kΩ umanjen za radni otpor zavojnice.

39. — Zadano je $L = 0{,}1$ mH $= 10^{-4}$ H, $R = 1{,}5\ \Omega$, $C = 400$ pF $= 4 \cdot 10^{-10}$ F; traži se ϑ i b. Iz jednadžbe (62) imamo: $\vartheta = \pi \cdot 1{,}5 \cdot \sqrt{4 \cdot 10^{-10}/10^{-4}} = 1{,}5\pi \cdot \sqrt{4 \cdot 10^{-6}} = 0{,}003\pi = 0{,}0094$. Dalje iz jednadžbe (63) slijedi: $b = 0{,}1592 \cdot 1{,}5/10^{-4} = 1592 \cdot 1{,}5$ Hz $= 2{,}39$ kHz.

40. — Zadano je $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi \cdot 1{,}2 \cdot 10^6 = 2{,}4\pi \cdot 10^6$, $\vartheta = 0{,}018$, odnosno $0{,}036$; traži se b. Da nađemo b, potreban nam je izraz R/L, kojega možemo dobiti iz jedn. (62): $R/L = \vartheta \cdot \omega_0/\pi$. Uvrstivši u jednadžbu (63) dobivamo: $b = 0{,}1592 \cdot \vartheta \cdot \omega_0/\pi = 0{,}1592 \cdot 0{,}018 \cdot 2{,}4\pi \cdot 10^6/\pi = 6877$ Hz $= 6{,}88$ kHz. Za $\vartheta = 0{,}036$ bit će b dvostruko, dakle $13{,}76$ kHz.

41. — Kako u jednoj sekundi imamo 150000 titraja, a niz titraja se proteže kroz 50 titraja, prvi niz će biti posve prigušen nakon $50/150000 = 1/3000$ s. Uključivši i pauze od $1/6000$ s imamo ukupno vrijeme od $(1/3000) + (1/6000) = 1/2000$ s. Moramo dakle imati 2000 iskara u svakoj sekundi, što znači da frekvencija izmjeničnog napona, kojim odašiljač napajamo, mora biti 1000 Hz, jer će iskra preskočiti kod svake pozitivne i negativne tjemene vrijednosti toga izmjeničnog napona.

42. — Zadano je $L_a = 18\ \mu H = 18 \cdot 10^{-6}$ H, $C_a = 200$ pF $= 2 \cdot 10^{-10}$ F, $f'_a = 841$ kHz $= 8{,}41 \cdot 10^5$ Hz; traži se f_a i L. Za vlastitu frekvenciju antene imamo iz jednadžbe (54): $f_a = 1/2\pi \cdot \sqrt{L_a \cdot C_a} = 1/2\pi \cdot \sqrt{18 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-10}} = 10^8/2\pi \cdot 6 = 2653000$ Hz $= 2653$ kHz. Ako ukopčamo induktivitet L u seriju s antenom, imat ćemo ukupni induktivitet $(L_a + L)$. Iz jednadžbe (54) imamo onda: $f'_a = 1/2\pi \cdot \sqrt{(L_a + L) \cdot C_a}$. Kvadriranjem dobivamo iz toga: $(L_a + L) \cdot C_a = 1/4\pi^2 \cdot f'_a$ ili $L = [(1/4\pi^2 \cdot f'^2_a) - L_a \cdot C_a] \cdot (1/C_a) = [(1/39{,}48 \cdot 70{,}73 \cdot 10^{10}) - 18 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-10}] \cdot (1/2 \cdot 10^{-10}) = (1/5585) - 18 \cdot 10^{-6} = 0{,}179 \cdot 10^{-8} - 0{,}018 \cdot 10^{-8} = 0{,}161 \cdot 10^{-8}$ H $= 0{,}161$ mH. Serij-

28. — Zadano je $\omega = 2\pi f = 100\pi$, $L = 50$ H, $C = 0{,}1$ μF $= 10^{-7}$ F, $I = 3$ mA $= 3 \cdot 10^{-3}$ A; traži se U, I_L i I_C. Napon na priključnicama računa se prema jednadžbi (51). Ovamo treba uvrstiti: $1/\omega L = 1/100\pi \cdot 50 = 1/5000\pi = 0{,}0000637 = 6{,}37 \cdot 10^{-5}$, a $\omega C = 100\pi \cdot 10^{-7} = 3{,}14 \cdot 10^{-5}$ Tada dobivamo: $U = 3 \cdot 10^{-3}/3{,}23 \cdot 10^{-5} = (3/3{,}23) \cdot 10^2 = 92{,}9$ V. Iz jednadžbe (17) dobivamo: $I_L = U/\omega L = 92{,}9 \cdot 6{,}37 \cdot 10^{-5} = 0{,}00592$ A $= 5{,}92$ mA. Iz jednadžbe (24) dobivamo: $I_C = U \cdot \omega C = 92{,}9 \cdot 10^{-5} \cdot \pi = 0{,}00292$ A $= 2{,}92$ mA. Pokus prema jednadžbi (49) daje zaista: $I = |(5{,}92 - 2{,}92)| = 3$ mA.

29. — Zadano je $L = 0{,}2$ mH $= 2 \cdot 10^{-4}$ H, $C = 200$ pF $= 2 \cdot 10^{-10}$ F; traži se f_0. Iz jednadžbe (54) imamo: $f_0 = 1/2\pi \cdot \sqrt{2 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-10}} = 10^7/4\pi = 795{,}8 \cdot 10^3$ Hz $\approx$ 796 kHz.

30. — Zadano je $C = 10\,000$ pF $= 10^{-8}$ F, $\omega_0 = 5\,000$; traži se L. Iz jednadžbe (52) imamo: $L = 1/\omega^2 \cdot C = 1/25 \cdot 10^6 \cdot 10^{-8} = 100/25 = 4$ H.

31. — Zadano je $\omega = 2\pi f_0 = 2\pi \cdot 191\,000 = 1{,}20 \cdot 10^6$, $C = 300$ pF $= 3 \cdot 10^{-10}$ F, $R = 3$ Ω; traži se L, Z_0 i ρ. Iz jednadžbe (52) imamo; $L = 1/\omega_0^2 \cdot C = 1/1{,}44 \cdot 10^{12} \cdot 3 \cdot 10^{-10} = 1/432 = 0{,}00231$ H $= 2{,}31$ mH. Prividni otpor je prema odsjeku 96. u slučaju rezonancije jednak radnom otporu: $Z_0 = R = 3$ Ω, Oštrina rezonancije može se dobiti iz jednadžbe (55): $\rho = \omega_0 L/R = 1{,}2 \cdot 10^6 \cdot 0{,}00231/3 = 924$.

32. — Zadano je $L = 5$ H, $R = 500$ Ω, $C = 2$ μF $= 2 \cdot 10^{-6}$ F, $U = 100$ V; traži se f_0, Z_0, I_0, U_R, U_L i U_C. Iz jednadžbe (24) imamo: $f_0 = 1/2\pi\sqrt{5 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 1\,000/2\pi \cdot \sqrt{10} = 50{,}3$ Hz. U slučaju rezonancije je prema odsjeku 96: $Z_0 = R = 500$ Ω Rrema tome će prema odsjeku 97. biti: $I_0 = U/R = 100/500 = 0{,}20$ A. Dalje imamo u slučaju rezonancije: $U_R = I_0 \cdot R = 0{,}20 \cdot 500 = 100$ V $U_L = I_0 \cdot \omega L = 0{,}20 \cdot 2\pi \cdot 50{,}3 \cdot 5 = 316$ V, a $U_C = I/\omega C = 0{,}20/2\pi \cdot 50{,}3 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 200\,000/201{,}2 \cdot \pi = 316$ V. Prema odsjeku 96. mora u slučaju rezonancije biti $U_R = U$, a $U_L = U_C$. U_L i U_C su ovdje znatno veći od U i međusobno se poništavaju.

33. — Zadano je $L = 10$ mH $= 10^{-2}$ H, $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi \cdot 10^{-3}$; traži se C i X_0 Iz jednadžbe (52) imamo: $C = 1/\omega_0^2$ i $L = 1/4\pi^2 \cdot 10^6 \cdot 10^{-2} = 10^{-4}/4\pi^2$ F $= 10^2/4\pi^2$ μF $= 2{,}53$ μF. Kako smo uzeli da je zavojnica bez gubitaka, bit će ukupni prazni otpor paralelnog spoja u slučaju rezonancije prema odsjeku 102. beskonačno velik: $X_0 = \infty$.

34. — Zadano je $L = 0{,}2$ mH $= 2 \cdot 10^{-4}$ H, $R = 2$ Ω. $C = 200$ pF $= 2 \cdot 10^{-10}$ F, $U = 0{,}1$ V; traži se Z_0 i I_0. Iz jednadžbe (56) imamo: $Z_0 \approx 2 \cdot 10^{-4}/2 \cdot 10^{-10} \cdot 2 = 10^6/2 = 5 \cdot 10^5$ Ω $= 500$ kΩ. Radi toga će biti: $I_0 = U/Z_0 = 1{,}0/5 \cdot 10^5 = 0{,}2 \cdot 10^{-6}$ A $= 0{,}2$ μA.

35. — Zadano je $L = 0.4$ mH $= 4 \cdot 10^{-4}$ H, $C = 100$ pF $= 10^{-10}$ F, $\rho = 200$; traži se R, ω_0 i Z_0. Iz jednadžbe (60) slijedi: $R = \rho\sqrt{L/C} = 200\sqrt{4 \cdot 10^{-4}/10^{-10}} = 200\sqrt{4 \cdot 10^6} = 200 \cdot 2 \cdot 10^3 = 400 \cdot 10^3$ Ω $= 400$ kΩ. Rezonantnu kružnu frekvenciju dobivamo iz jednadžbe (53): $\omega_0 = 1/\sqrt{4 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-10}} = 10^7/2 = 5 \cdot 10^6$ [1/s]. U slučaju paralelne rezonancije je prema odsjeku 111. prividni otpor jednak radnom otporu, dakle: $Z_0 = R = 400$ kΩ.

53. — Zadano je $\mathfrak{E} = 0{,}2$ mV/m $= 0{,}2 \cdot 10^{-3}$ V/m, $h_w = 8$ m, $I = 16$ μA $= 16 \cdot 10^{-6}$ A; traži se R_a. Najveću struju u anteni imat ćemo prema odsjeku 164. za $R_a = R_s$; prema tome dobivamo iz jednadžbe (72): $I = U/2 R_a$ ili $R_a = U/2 I$. Uvrstimo li ovdje prema jednadžbi (71) vrijednost $U = \mathfrak{E} \cdot h_w$, imamo: $R_a = \mathfrak{E} \cdot h_w/2 I = 0{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot 8/32 \cdot 10^{-6} = 0{,}05 \cdot 10^3 = 50$ Ω

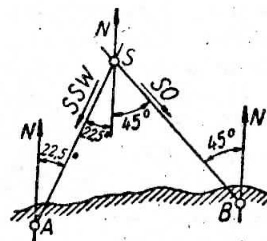
54. — Kako je prelomna čvrstoća antenske žice 180 kg/mm², a presjek žice $0{,}5^2 \cdot \pi/4 = 0{,}196$ mm², žica bi pukla kod opterećenja od $180 \cdot 0{,}196 = 35{,}28$ kg. Uz faktor sigurnosti 4 opterećenje bi smjelo biti samo 8,82 kg.

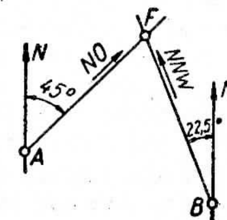
55. — Zadano je $a = 1$ m $= 100$ cm, $w = 7$, odnosno 28 zavoja, $b = 18$ mm, odnosno 81 mm $= 1{,}8$ cm, odnosno 8,1 cm, $C = 500$ pF $= 5 \cdot 10^{-10}$ F, traži se L i λ. Iz jednadžbe (73) imamo: $L = 18{,}4 \cdot 100 \cdot 49 \cdot log\,(2{,}15 \cdot 100/1{,}8) \cdot 10^{-3} = 90160 \cdot log\ 119{,}4 \cdot 10^{-6} = 0{,}09016 \cdot 2{,}0770 = 0{,}19$ mH. Za drugi slučaj, dobivamo na isti način 2,06 mH. Najveća duljina vala slijedi iz jednadžba (54) i (65) (vidi rješenje zadatka 46): $\lambda = 3 \cdot 10^8 \cdot 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C} = 6\pi \cdot 10^8 \cdot \sqrt{0{,}19 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-10}} = 6\pi \cdot 10^8 \cdot \sqrt{9{,}5 \cdot 10^{-14}} = 6\pi \cdot 10^8 \cdot 3{,}08 \cdot 10^{-7} \approx 581$ m. Za drugi slučaj dobivamo na isti način 1913 m.

56. — Zadano je $F = d^2 \cdot \pi/4 = \pi/4 = 0{,}7854$ m², $w = 10$ zavoja, $\mathfrak{E} = 2$ mV/m $= 2 \cdot 10^{-3}$ V/m, $\lambda = 300$ m; traži se U. Iz jednadžbe (75) dobivamo: $U = 2\pi \cdot 10 \cdot 0{,}7854 \cdot 2 \cdot 10^{-3}/300 = 0{,}000329$ V $\approx 0{,}33$ mV.

57. — Zadano je $a = 800$ mm $= 0{,}8$ m, $w = 8$ zavoja, $f = 600$ kHz; traži se h_w. Efektivnu visinu okvirne antene dobivamo iz odsjeka 179. Za to nam treba duljina vala, a tu dobivamo iz jednadžbe (66): $\lambda = 300 \cdot 10^3/600 = 500$ m. Prema tome je: $h_w = 2\pi \cdot (w \cdot F/\lambda) = 2\pi \cdot (8 \cdot 0{,}64/500) = 0{,}0205\pi = 0{,}0644$ m $= 6{,}44$ cm.

58. — Telegrafista na brodu unosi u geografsku kartu smjerove, dakle kutove 22,5° (*SSW*) i 45° (*SO*) prema pravcu sjever-jug u točkama *A*, *B*, u kojima se nalaze odašiljači, koje je slušao. Presječnica obaju smjerova daje mu mjesto, na kojem se njegov brod nalazi.

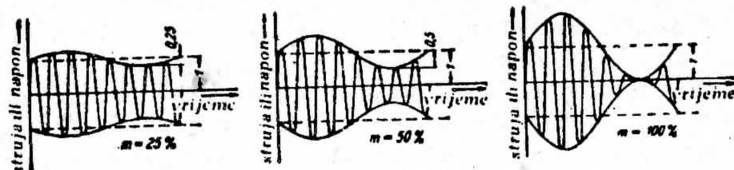




59. — Obje stanice *A* i *B* unose u karte smjerove, koje su odredili, dakle kutove 45° (*NO*) i 22,5° (*NNW*) (vidi sliku). Presječnica obaju smjerova pokazuje mjesto na kojem se avion nalazi.

60. — Zadano je $\lambda = 500$ m, $f' = 1{,}2$ kHz; traži se najprije f. Preuređenjem jednadžbe (66) dobivamo: $f = 3 \cdot 10^5/\lambda = 3 \cdot 10^5/500 = 600$ kHz. Na jedan niskofrekventni titraj dolazi dakle $600/1{,}2 = 500$ visokofrekventnih titraja.

61. — Kod stupnja modulacije od 25%, odnosno 50% i 100% najveća amplituda niskofrekventnih titraja mora biti jednaka $2a = 0{,}25$, odnosno



0,5, odnosno 1, ako je amplituda vala nosioca $A = 1$. Iz toga dobivamo slike kao gore.

62. — Zadano je $f' = 800$ Hz, $f = 200$ kHz $= 200000$ Hz, $A = 100$ V, $2a = 70$ V; traže se bočne frekvencije i m. Modulacijom s $f' = 800$ Hz dobivamo prema odsjeku 192 *nosivu frekvenciju* $f = 200$ kHz $=$ 200000 Hz i obje *bočne frekvencije* $f + f' = 200000 + 800 =$ 200800 Hz i $f - f' = 200000 - 800 =$ 199200 Hz. Iz jednadžbe (78) dobivamo dalje: $m = 2a/A = 70/100 = 0{,}70 = 70\%$.

63. — Zadano je $L_a = 20\ \mu H = 20 \cdot 10^{-6}$ H, $C_a = 180$ pF $= 1 \cdot 8 \cdot 10^{-10}$ F, $L = 9$ mH $= 9 \cdot 10^{-3}$ H; traži se f_0 i λ_0. Iz jednadžbe (54) imamo: $f_0 \doteq 1/2\pi \cdot \sqrt{L_a \cdot C_a} = 1/2\pi \cdot \sqrt{20 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}8 \cdot 10^{-10}} = 1/2\pi \cdot \sqrt{36 \cdot 10^{-16}} = 10^8/12\pi \doteq 2{,}65 \cdot 10^6$ Hz $=$ 2,65 MHz. Prema tome će biti (jednadžba 65): $\lambda_0 = 3 \cdot 10^8/2{,}65 \cdot 10^6 = 113$ m. Ako dodamo induktivitet $L = 9$ mH, imamo mjesto L_a vrijednost $L + L_a$ (vidi odsjek 198). Kako je međutim $L_a = 20\ \mu H$ maleno prema $L \doteq 9$ mH $= 9000\ \mu H$, možemo L_a obzirom na L izostaviti. U tom slučaju imamo: $f' = 1/2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C_a} = 1/2\pi \cdot \sqrt{9 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}8 \cdot 10^{-10}} = 1/2\pi \cdot \sqrt{1{,}62 \cdot 10^{-12}} = 10^6/2{,}54\pi = 1{,}25 \cdot 10^5$ Hz $=$ 125 kHz. Prema jednadžbi (66) imamo dakle $\lambda'_0 = 3 \cdot 10^5/125 =$ 2400 m.

64. — Zadano je $L_a = 25\ \mu H = 25 \cdot 10^{-6}$ H, $C_a = 250$ pF $= 2{,}5 \cdot 10^{-10}$ F, $L = 0{,}2$ mH $= 2 \cdot 10^{-4}$ H, $C = 400$ pF $= 4 \cdot 10^{-10}$ F; traži se f_0. Kod ovog spoja moramo prema odsjeku 200. za induktivitet uvrstiti $L + L_a$, a za kapacitet $C_a \cdot C/(C_a + C)$ u jednadžbi (51). Kako je $L + L_a = 2 \cdot 10^{-4} + 25 \cdot 10^{-6} = 2{,}25 \cdot 10^{-4}$ H, a za $C_a \cdot C/(C_a + C) = 2{,}5 \cdot 10^{-10} \cdot 4 \cdot 10^{-10}/(2{,}5 \cdot 10^{-10} + 4 \cdot 10^{-10}) = 10 \cdot 10^{-10}/6{,}5 = 1{,}54 \cdot 10^{-10}$ F, bit će $f_0 = 1/2\pi \sqrt{2{,}25 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}54 \cdot 10^{-10}} = 10^7/2\pi \cdot \sqrt{3{,}465} \approx 855000$ Hz $=$ 855 kHz.

65. — Noseća frekvencija odašiljača, kod kojeg je $\lambda = 300$ m, prema odsjeku 66. f — 1000 kHz. Uz modulacionu frekvenciju $f' = 8$ kHz odašiljač prema odsjeku 190. isijava osim nosive frekvencije još i bočne frekvencije $f - f' = 992$ kHz i $f + f'$ 1008 kHz. Tome prema odsjeku 66. odgovara valno područje od 300000/992 do 300000/1008 dakle od 302,4 do 297,6 m, to jest područje od 4,8 m, odnosno $\pm$ 0,8% duljine vala nosioca.

66. — Zadano je $U_0 = 5$ V, $U = 20$ mV $= 0{,}020$ V; traži se s. Iz jednadžbe (79) slijedi: $s = U_0/U = 5/0{,}020 = 250$.

67. — Zadano je $L_1 = 0{,}1$ mH, $L_2 = 0{,}3$ mH, $k = 0{,}80$; traži se L i L'. Iz odsjeka 214. imamo za zavojnice namatane *istim* smjerom: $L = L_1 + L_2 + 2\ k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} = 0{,}4 + 1{,}60 \cdot \sqrt{0{,}03} = 0{,}4 + 0{,}28 =$ 0,68 mH; za zavojnice namatane *protivnim* smjerom imamo: $L' = L_1 + L_2 - 2\ k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} = 0{,}4 - 0{,}28 =$ 0,12 mH.

68. — Zadano je $L_1 = L_2 = 10$ H; traži se L_0. Najveći induktivitet imamo kod najčvršće veze, dakle za $k = 1$. Tada imamo prema odsjeku 214.: $L_0 = 4\ L_1 =$ 40 H.

69. — Zadano je $L_1 = L_2 = 0{,}5$ mH, $C_1 = C_2 = 200$ pF, $L_k = 0{,}1$ mH, $C_k = 5000$ pF, traži se k i k'. Za *induktivno galvansku vezu* imamo, budući da je $L_1 = L_2$, prema odsjeku 215.: $k = L_k/(L_1 + L_k) = 0{,}1/0{,}6 = 0{,}17 = 17\%$. Za kapacitivnu vezu imamo, budući da je $C_1 = C_2$, prema odsjeku 215.: $k' = C_1/(C_1 + C_k) = 200/5200 = 0{,}038 = 3{,}8\%$.

70. — Zadano je $f_0 = 800$ kHz, $f_1 = 760$ kHz; traži se k i f_2. Iz jedn. (84) slijedi: $f_1^2 = f_0^2/(1 + k)$, dakle: $k = (f_0/f_1)^2 - 1 = (800/760)^2 - 1 = 0{,}11 = 11\%$. Dalje imamo iz jednadžbe (84): $f_2 = 800/\sqrt{1 - 0{,}11} = 800/\sqrt{0{,}89} =$ 848 kHz.

71. — Ako je $k = 100\%$ ili $k = 1$, imamo prema jednadžbi (84): $f_1 = f_0/\sqrt{2} = 0{,}707 \cdot f_0$, a $f_2 = f_0/0 = \infty$. Frekvencija f_2 je dakle neizmjerno daleko od vlastite frekvencije f_0, dok je frekvencija f_1 oko 70,7% frekvencije f_0. Radi toga ne ćemo više imati dvije, nego samo jednu veznu frekvenciju.

72. — Zadano je $L_1 = L_2 = 0{,}1$ mH $= 10^{-4}$ H, $\omega_0 = 10^7$, $f_0 = 10^7/2\pi$, $k = 0{,}01$, $R_2 = 10\ \Omega$; traži se f_1, f_2 i R_k. Iz jednadžbe (84) imamo: $f_1 = 10^7/2\pi\sqrt{1{,}01} \approx 1584000$ Hz $=$ 1584 kHz. Dalje imamo: $f_2 = 10^7/2\pi\sqrt{0{,}99} \approx 1600000$ Hz $=$ 1600 kHz Iz odsjeka 220., budući da je $L_1 = L_2$, slijedi: $R_k = (\omega_0 \cdot k \cdot L_1)^2/R_2 = (10^7 \cdot 0{,}01 \cdot 10^{-4})^2/10 = 100/10 = 10\ \Omega$.

73. — Zadano je $C_0 = 30$ pF $= 0{,}3 \cdot 10^{-10}$ F, $C_m = 500$ pF $= 5 \cdot 10^{-10}$ F, $\alpha = 60^0$, $\lambda = 500$ m; traži se L. Iz odsjeka 227., preuredivši jednadžbu, slijedi: $a = \lambda/\sqrt{k \cdot \alpha + C_0} = 6 \cdot 10^9 \pi \cdot \sqrt{L}$, dakle nakon kvadriranja: $L = \lambda^2/36 \cdot 10^{16} \cdot \pi^2 \cdot (k \cdot \alpha + C_0)$. Konstantna vrijednost k je prema odsjeku 226.: $k = (C_m - C_0)/180^0 = 4{,}7 \cdot 10^{-10}/180^0$, a onda: $k \cdot \alpha = 4{,}7 \cdot 10^{-10} \cdot 60/180^0 = 1{,}57 \cdot 10^{-10}$. Odatle imamo $L = 25 \cdot 10^4/36 \cdot 10^{16} \cdot \pi^2 \cdot (1{,}57 \cdot 10^{-10} + 0{,}3 \cdot 10^{-10}) = 25/36\pi^2 \cdot 187 = 0{,}000376$ H $=$ 0,376 mH.

74. — Zadano je $L = 0{,}24$ mH $= 2{,}4 \cdot 10^{-4}$ H, $\alpha = 90^0$, $\lambda_m = 700$ m, $\lambda_0 = 160$ m; traži se C. Iz odsjeka 230 imamo: $\log C = 2\ (k \cdot \alpha + i\ a) = 2 \left\{ [(\log \lambda_m - \log \lambda_0)\ \alpha/180^0] + \log \lambda_0 - \log 6 \cdot 10^8 \cdot \pi \cdot \sqrt{L} \right\} = 2 \left\{ [(2{,}8451 - 2{,}2041)\ 90^0/180^0] + 2{,}2041 - 7{,}4654 \right\} = -9{,}8816 = 0{,}1184 - 10$, to jest: $C = 1{,}31 \cdot 10^{-10}$ F $=$ 131 pF.

75. — Zadano je $v = 1/5$ brzine svijetla $= 60000$ km/s; traži se U. Iz jednadžbe: $v = 594 \cdot \sqrt{U}$ dobivamo kvadriranjem: $U = v^2/594^2 = (60000/594)^2 \approx$ 10200 V.

76. — Promjer atoma iznosi prema odsjeku 240. okruglo $2 \cdot 10^{-7}$ mm, a promjer elektrona okruglo $4 \cdot 10^{-12}$ mm; prema tome je atom $2 \cdot 10^{-7}/4 \cdot 10^{-12} = 0{,}5 \cdot 10^5$ puta veći od elektrona. Ako dakle elektron ima

zamišljeni promjer od 256 m, morao bi atom imati promjer od okruglo $256 \cdot 0{,}5 \cdot 10^5 = 128 \cdot 10^5$ m = 12 800 km; atom bi dakle bio *po prilici velik kao zemlja*.

77. — Zadano je $T = 627 + 273 = 900^0$ aps., $b = 17450$; traži se I_s. Iz Richardsonove jednadžbe (jednadžba 85) imamo: $I_s = 60{,}2 \cdot 900^2 \cdot 2{,}718^{-\frac{17450}{900}} = 60{,}2 \cdot 8{,}1 \cdot 10^5 \cdot 2{,}718^{-19,39}$, dakle $I_s = 4{,}88 \cdot 10^7 \cdot 2{,}718^{-19,39}$. Logaritmiranjem dobivamo: $\log 4{,}88 + \log 10^7 - 19{,}39 \cdot \log 2{,}718 = 0{,}6884 + 7{,}0000 - 19{,}39 \cdot 0{,}4343 = 7{,}6884 - 8{,}4211 = -0{,}7327 = 0{,}2673 - 1$, dakle $I_s = 0{,}185$ A/cm² = 1,85 mA/mm².

78. — Struja zasićenja računa se prema jednadžbi (85). Prema odsjeku 245. imamo za barij $b = 17\,450$, a za volfram s torijem $b' = 30\,240$. Kako je žarna temperatura $T = 727 + 273 = 1\,000^0$ aps. u oba slučaja jednaka, imamo odnos struja zasićenja: $I_s / I'_s = e^{-\frac{b}{T}} e^{-\frac{b'}{T}} = e^{\frac{b'-b}{T}} = 2{,}718^{\frac{12790}{1000}} = 2{,}718^{12,39} \approx 358\,700$, to jest struja zasićenja barijeve katode mora biti oko 358 700 puta veća od struje zasićenja katode od volframa s torijem! Iz ovoga se vidi velika prednost barijeve katode kod razmjerno niskih žarnih temperatura.

79. — Zadano je $l = 14$ mm, $r = 2$ mm, $U_a = 100$ V; traži se I_r. Iz Langmuirove jednadžbe prost rnog naboja (jednadžba 86) i odsjeka 248. slijedi: $I_r = k \cdot U_a \sqrt{U_a} = 14{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot (l/r) \cdot U_a \cdot \sqrt{U_a} = 14{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot (14/2) \cdot 100 \cdot \sqrt{100} = 102{,}2 \cdot 10^{-4} \cdot 10 = 0{,}102$ A = 102 mA.

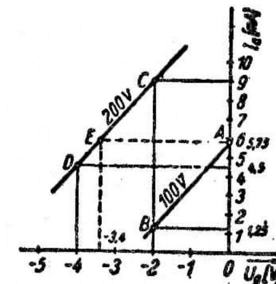
80. — Budući da su sve tri elektronke spojene u seriju, na njihovim žarnim nitima imat ćemo pad napona $U_h = 3 \cdot 13 = 39$ V. Predotpor mora dakle preuzeti napon $U_v = 220 - U_h = 181$ V. Kako je jakost struje grijanja $I_h = 200$ mA = 0,200 A, bit će predotpor: $R_v = U_v / I_h = 181/0{,}200 = 905\ \Omega$. Ukupni učin potrošen na žarenje bit će: $N_h = 220 \cdot 0{,}200 = 44$ W. Od toga na sam predotpor otpada. $N_v = 181 \cdot 0{,}200 = 36{,}2$ W.

81. — Iz ključa u odsjeku 259. imamo: AC 2 = trioda — 4 V-indirektno žarenje; ABC 1 = 4 V—indirektno žarenje dioda-trioda. AD 1 = 4 V—izlazna trioda, CL 4 = 200 mA—univerzalna—izlazna pentoda, CF 7 = 200 mA—unuverzalna - visokofrekventna pentoda, KB 2 = 2 V - baterijska duodida, EK 1 = 6,3 V—indirektno žarenje—oktoda, CY 2 = 200 mA—univerzalna—dvostrano ispravljanje.

82. — Ukupni učin utrošen na žarenje prijemnika s tri elektronke iz *U-serije* iznosi prema odsjeku 259.: $N = U \cdot I = 220 \cdot 0{,}050 = 11$ W, a s elektronkama iz *C-serije* $N' = 220 \cdot 0{,}2 = 44$ W; odnos utrošenog učina je prema tome 1:4.

83. — Zadano je D = 6% = 0,06, $U_{st} = 10{,}4$ V, $U_g = -4$ V; traži se U_a i U_v. Iz jednadžbe (87) slijedi; $U_a = (U_{st} - U_g)/D = (10{,}4 + 4)/0.06 = 1440/6 = 240$ V. Anodna struja prestaje teći prema odsjeku 264. uz pomačni napon: $U_v = -D \cdot U_a = -0{,}06 \cdot 240 = -14{,}4$ V.

84. — $U_g - I_a$ karakteristika nacrtana je na priloženoj slici; traži se S, R_i, R i D. Iz jednadžbe (99) imamo za karakteristiku AB: $S = \Delta I_a / \Delta U_g = 5{,}75 - 1{,}25/0 - (-2) = 4{,}50/2 = 2{,}25$ mA/V. Dalje slijedi iz jednadžbe (91) za $U_g = -2$ V: $R_i = \Delta U_a / \Delta I_a = (200 - 100)/(0{,}009 - 0{,}00125) = 100/0{,}00775 \approx 12900\ \Omega = 12{,}90$ kΩ. Otpor R ovisan je o naponu na rešetki i na anodi i može poprimiti razne vrijednosti: tako da na primjer imamo za točku A ($U_a = 100$ V, $U_g = 0$ V): $R = U_a / I_a = 100/0.00575 \approx 17390\ \Omega = 17{,}39$ kΩ. Za točku B ($U_a = 100$ V, $U_g = -2$ V): $R' = 100/0{,}00125 = 80000\ \Omega = 80$ kΩ, a za



točku C ($U_a = 200$ V, $U_g = -2$ V): $R'' = 200/0{,}009 \approx 22220\ \Omega = 22{,}22$ kΩ. Konačno imamo za točku D ($U_a = 200$ V, $U_g = -4$ V): $R = 200/0{,}0045 \approx 44440\ \Omega = 44{,}44$ kΩ. Vidimo dakle kako se unutarnji otpor elektronke $R_i = 12{,}90$ kΩ znatno razlikuje od otpora R! Prohvat možemo izračunati iz jednadžbe (92): $D = 1/S \cdot R_i = 1/0{,}00225 \cdot 12900 = 0{,}0344 = 3{,}4\%$. Istu vrijednost dobivamo iz karakteristike na slici jer kod iste anodne struje od 5,75 mA promjeni anodnog napona od 100 V odgovara promjena napona na rešetki od AE 3,4 V, t. j. i tu je: $D = 3{,}4/100 = 0{,}034 = 3{,}4\%$.

85. — Zadano je $D = 29\% = 0{,}29$, $S = 2{,}5$ mA/V = 0,0025 A/V; traži se R_i. Iz jednadžbe (92) slijedi: $R_i = 1/S \cdot D = 1/0{,}0025 \cdot 0{,}29 = 1/0{,}000725 \approx 1379\ \Omega = 1{,}38$ kΩ.

86. — Zadano je $D_1 = 1\% = 0{,}01$, $D_2 = 4\% = 0{,}04$, $U_{g2} = 100$ V, $U_a = 200$ V; traži se D i U_v. Iz odsjeka 274. imamo: $D = D_1 \cdot D_2 = 0{,}01 \cdot 0{,}04 = 0{,}0004 = 0{,}04\%$. Dalje imamo prema odsjeku 274.: $U_v = U_{g1} = -(D_2 \cdot U_{g2} + D_1 \cdot D_2 \cdot U_a) = -(0{,}04 \cdot 100 + 0{,}0004 \cdot 200) = -(4 + 0{,}08) = -4{,}1$ V.

87. — Zadano je $S = 2{,}1$ mA/V = 0,0021 A/V, $R_i = 2$ MΩ = 2 000 000 Ω; traži se D. Iz jednadžbe (92) imamo: $D = 1/S \cdot R_i = 1/0{,}0021 \cdot 2\,000\,000 = 1/4200 = 0{,}000238 = 0{,}024\%$.

ABECEDNO KAZALO

Prvi broj označuje stranicu, drugi (u zagradi) odsjek

SADRŽAJ:

PRVI DIO:

FIZIKALNI OSNOVI RADIOTEHNIKE

I. Proizvođenje visokofrekventnih titraja (bez elektronskih cijevi)

II. Prijem visokofrekventnih titraja (bez elektronskih cijevi)

III. Fizikalni osnovi elektronskih cijevi